



*Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos,
Canales y Puertos.*
UNIVERSIDAD DE CANTABRIA



MODELADO Y OPTIMIZACIÓN DE LOS RECURSOS DE UNA CUENCA HIDROGRÁFICA. APLICACIÓN DE A LA CUENCA DEL SEGURA

Trabajo realizado por:

Javier Arto Cuesta

Dirigido:

Pedro Díaz Simal

Saúl Torres Ortega

Titulación:

**Máster Universitario en Ingeniería de
Caminos, Canales y Puertos**

Santander, septiembre de 2019

TRABAJO FINAL DE MÁSTER

AUTOR: JAVIER ARTO CUESTA

DIRECTORES: PEDRO DÍAZ SIMAL
SAÚL TORRES ORTEGA



Palabras clave: *ingeniería, análisis socioeconómico, programación lineal, cuenca hidrográfica, modelado, optimización.*

RESUMEN

El presente Trabajo de Fin de Máster es un estudio de carácter socioeconómico sobre los efectos de las políticas hídricas en una cuenca hidrográfica modelada mediante programación lineal, con una función objetivo a optimizar en términos económicos.

Para elaborar el análisis, se ha realizado en primer lugar un modelado teórico mediante un software comercial que permite la introducción de un paquete de programación lineal que requiere unas condiciones de contorno y la definición de una función objetivo para su optimización. Las condiciones de contorno utilizadas reflejan las entradas de caudal a la red, las demandas de las diferentes actividades en la cuenca, así como los retornos a la red, caudales ecológicos y las relaciones entre variables de forma que se modela el recorrido de los caudales a lo largo de la red. Por otro lado, la función objetivo viene caracterizada por los factores productivos de cada una de las actividades para monetizar el valor de la cuenca y tener un término común que permita su análisis.

La metodología utilizada en el modelo teórico se ha empleado posteriormente para su aplicación al caso real de la cuenca hidrográfica del Segura, permitiendo sobre este modelo aplicar diferentes escenarios de políticas hídricas para entender la distribución de recursos en la cuenca y la rentabilidad de dichas medidas.

Los resultados obtenidos demuestran que es esencial para la cohesión social y económica de la cuenca y para el mantenimiento ambiental de la misma la aplicación de medidas de equilibrio entre actividades y zonas, generando una gestión integral que debe basarse en centrar las inversiones en medidas de mejora de la productividad de las actividades y en el ahorro de recurso en los procesos.

Además, pone de manifiesto que la redistribución de los recursos en la búsqueda del equilibrio en la satisfacción de las demandas en una cuenca por naturaleza deficitaria no tiene consecuencias negativas a nivel económico.

Finalmente, demuestra en su aplicación práctica que para alcanzar un beneficio integral de la cuenca es recomendable el aumento de cesión de recursos a las actividades industriales y relacionadas con el ocio, por ser las más rentables y las que presentan menor demanda, pues su rentabilidad puede derivarse posteriormente en nuevas inversiones que permitan afrontar los retos futuros asociados a escenarios de escasez de recursos.

AUTHOR: JAVIER ARTO CUESTA

DIRECTORS: PEDRO DÍAZ SIMAL
SAÚL TORRES ORTEGA



Key words: *engineering, socioeconomic analysis, lineal analysis, watershed, modelling, optimization.*

ABSTRACT

This Master's final project is a socioeconomic study on the effects of water politics in a watershed, modelled using linear programming, with a function to be economically optimised.

To start with, a theoretical modelling was carried out using a linear-programming commercial software. Said software requires the definition of a target function for its optimization and boundary conditions.

Boundary conditions such as inflows, water demands of different activities and ecological flows are used to replicate the flow path throughout the network. The target function is defined with the productive factors of each of the activities, in order to monetize the value of the watershed and obtain a common factor which would enable to analyse it.

The methodology used in the theoretical model has been applied to the Segura river case study, allowing different water policy scenarios to be adjusted in order to understand the distribution of resources in the watershed and the profitability of the measures subject of the analysis.

The results determine that the application of measures should lead to integral management based on investment strategies focused on improvement measures for productivity and the conservation of resources. This study has also revealed that the redistribution of resources does not have negative economic consequences.

Moreover, this study demonstrates that it is advisable to increase the transfer of resources to industrial and leisure-related activities, as they are the most profitable and those with the lowest demand, since their profitability can incentivise future investment



Índice

1. INTRODUCCIÓN	2
1.1. PROBLEMÁTICA EXISTENTE	5
1.2. MOTIVACIÓN Y OBJETIVO	7
2. POLÍTICAS DE GESTIÓN DE LOS RECURSOS HÍDRICOS EN ESPAÑA	9
2.1. EVOLUCIÓN HISTÓRICA	9
2.2. SITUACIÓN ACTUAL DEL SISTEMA DE GESTIÓN	13
2.2.1. Sistema de gestión	13
2.2.2. Normativa	15
3. OBTENCIÓN DEL MODELO	20
3.1. METODOLOGÍA Y HERRAMIENTAS	20
3.2. MODELO TEÓRICO DE CUENCA	23
3.2.1. Diseño inicial del modelo	23
3.2.2. Definición y características de la cuenca teórica	24
3.2.3. Representación matemática de la cuenca	29
3.2.4. Optimización del modelo	30
3.3. APLICACIÓN A UNA CUENCA EXISTENTE. CASO DEL SEGURA	49
3.3.1. Características físicas de la cuenca del Segura	49
3.3.2. Balance de recursos hídricos	50
3.3.3. Generación del modelo	55
3.3.4. Resultados	70
3.3.5. Enfoques futuros	86
4. CONCLUSIONES	88
5. BIBLIOGRAFÍA	90



1. INTRODUCCIÓN

Los recursos hídricos, con su condición de finitos e imprescindibles para el desarrollo de las sociedades y sus economías, requieren un sistema de gestión y una planificación adecuada, coherente y que permita la cohesión de los territorios de dichas sociedades. A su vez, estos sistemas de gestión deben garantizar la seguridad de los individuos, de sus bienes, sus territorios y sus actividades, así como de los ecosistemas existentes, a través de la minimización de los riesgos que puedan presentarse sobre éstos.

La forma de gestionar los recursos hídricos ha variado a lo largo de los años, con especial hincapié durante el siglo XX, en el cual se pasó de un uso tradicional e indiscriminado de los recursos con el interés puesto únicamente en abastecer las necesidades de los individuos y de las actividades económicas como la minería, la agricultura o las industrias, hacia un sistema de gestión más respetuoso y concienciado con el medioambiente y, en el cual, las políticas sociales e hidráulicas se aúnan hacia un mismo objetivo de desarrollo sostenible, alentado en gran parte por la percepción de la escasez de recursos, lo cual es evidente en todo el planeta, sin importar el grado de desarrollo de las sociedades.

En este sentido, durante los últimos años se ha colocado la sostenibilidad y, en concreto, el agua en el foco de las políticas y programas de los organismos internacionales, categorizándolo como un problema global y crítico de este siglo. Entre estos programas, cabe destacar dos de los propuestos por la Organización de Naciones Unidas, como son los Objetivos de Desarrollo del Milenio y los Objetivos de Desarrollo Sostenible. En particular, estos últimos establecen textualmente en el Objetivo 6: “garantizar la disponibilidad de agua y su gestión sostenible y el saneamiento para todos”, poniendo el foco en aspectos como el hecho de que los problemas de escasez del agua tienen una tendencia ascendente, a pesar de afectar ya en la actualidad a más del 40% de la población. Además, como el propio enunciado del objetivo indica, se hace hincapié en la sostenibilidad debido a otros preocupantes que recogen en los estudios realizados, como el hecho de la falta de recarga de las cuencas hidrográficas, problemática que afecta a más 1700 millones de personas o que las aguas residuales son vertidas en porcentajes superiores al 80% sin haber aplicado ningún tipo de tratamiento de recuperación de las características.

No sólo en cuanto a la gestión de la disponibilidad del agua y a la preocupación por el mantenimiento de su calidad se han centrado estos programas, sino que, en gran medida, el foco se ha puesto en la preocupante situación que vive el planeta como consecuencia de los efectos del cambio climático en la que el agua es punto crucial, con noticias diarias de desastres asociados a los fenómenos extremos asociados a ella, imputándose el 70% de la mortalidad relacionada con desastres naturales. Estos fenómenos, históricamente, acontecidos en lugares con menor desarrollo, ponen hoy en peligro las bases de la sociedad del mundo desarrollado, pues el riesgo de que se produzcan estos eventos en cualquier lugar se incrementa exponencialmente.

En este punto de la gestión se encuentra España, debido a un reparto desigual y a una sobreexplotación de los recursos hídricos, que ha creado durante años situaciones de tensión y debate social entre comunidades y cuencas y ha dejado clara la necesidad de políticas con el objetivo de paliar estas desigualdades. Especialmente en la actualidad, como ya se ha indicado en el párrafo anterior a escala global, también dentro del propio territorio peninsular las



problemáticas asociadas al agua se han visto reforzadas por la mayor frecuencia e intensidad de fenómenos extremos, como sequías e inundaciones, en aquellas zonas en las que históricamente la gestión del agua en España ha tenido unos resultados más cuestionables.

Durante las últimas décadas, se viene desarrollando para hacer frente a esta situación un sistema de gestión sostenible e integrado, entendiéndose lo siguiente para cada uno de los términos, según la acepción de la RAE adaptada al tema que se aborda en este trabajo:

- *Sostenible*: que se puede mantener durante largo tiempo sin agotar los recursos o causar grave daño al medio ambiente.
- *Integrado o integral*: que comprende todos los elementos o aspectos de algo, en este caso todos los recursos hídricos disponibles, ya sean superficiales o subterráneos, reutilizados, desalados o los que se proporcionan gracias al uso de la tecnología.

Hasta llegar al actual sistema de gobernanza del agua en España, con unos evidentes rasgos de poner la base de la gestión en la planificación, en el uso creciente de las tecnologías, en el interés en la participación pública y en la colaboración entre las distintas Administraciones Públicas y el sector privado, se han ido adquiriendo conocimientos y alcanzando numerosos hitos durante siglos como se expone en la siguiente perspectiva histórica. Sin embargo, es interesante previamente entender algunos conceptos básicos, como son:

- *Cuenca hidrográfica*: territorio o superficie que abarca todas las aguas de escorrentía que alcanzan el mar a través de un único cauce, limitado por las divisorias de aguas. En España existen las siguientes cuencas hidrográficas en orden decreciente de extensión: Duero, Ebro, Tajo, Guadiana, Guadalquivir, Júcar, Segura, Mondego, Turia, Llobregat, Mijares, Nalón, Guadalete, Voga, Guadalhorce y Ter. Supone la unidad mínima e indivisible de gestión del agua.
- *Organismos de Cuenca*: son entidades que se crearon con motivo de la Ley de Aguas de 1985 que se conocen como **Confederaciones Hidrográficas** en aquellas cuencas que atraviesan más de una Comunidad Autónoma o bien que forman parte de las Administraciones Hidráulicas de las Comunidades Autónomas a las cuales el Estado haya cedido las competencias de su dominio público hidráulico, en las que se conocen como **cuencas hidrográficas internas** (Galicia, País Vasco, Cataluña, Baleares, Andalucía - Cuenca Mediterránea Andaluza y Atlántica Andaluza- y Canarias). Las Confederaciones Hidrográficas, como se las describe oficialmente en las fuentes del Ministerio para la Transición Ecológica, son entidades de derecho público con personalidad jurídica independiente del Estado, que tienen como función la gestión del dominio público hidráulico y la realización de los Planes Hidrológicos de cuenca.
- *Planes Hidrológicos*: es el elemento básico de ordenación de los recursos hidráulicos tanto a nivel estatal (Plan Hidrológico Nacional, PHN) como de cuencas (PHCs), que establece el equilibrio de estos recursos mediante el empleo de la planificación.
- *Demarcaciones Hidrográficas*: unidad administrativa surgida a través de la Directiva Marco del Agua del año 2000 que corresponde territorio terrestre y marino constituido por una o varias cuencas vecinas y las aguas de transición existentes. En España existen las siguientes:



Ilustración 1: Demarcaciones Hidrográficas españolas (Fuente: www.iAgua.es)



1.1. PROBLEMÁTICA EXISTENTE

El sistema de gestión de los recursos hídricos en España, que se ha esbozado anteriormente y que se definirá con más atención en capítulos posteriores, se presenta como un sistema moderno, que ha llevado a cabo una evolución a lo largo de los años, pero que, a pesar de su alto grado de desarrollo normativo y funcional, presenta una serie de aspectos que debieran ser corregidos para su funcionamiento óptimo, tanto para el nivel que recoge el ámbito entre cuencas, como dentro de la propia cuenca. Estos aspectos, a los que se tratará de dar respuesta en este estudio, se producen esencialmente a nivel estructural, debido a que, por las características geográficas naturales y de ocupación no planificada a lo largo del territorio nacional, las actividades humanas, presentan un rápido consumo de los recursos hídricos - llegando incluso a su agotamiento en ciertas épocas del año- lo que se traduce en un bajo rendimiento en su utilización.

Esta problemática, en países del primer mundo como España, viene derivada en gran medida por el sistema socioeconómico dominante, el cual prepondera la maximización de los beneficios económicos sobre todo lo demás, incluso si con ello se asocia el deterioro ambiental y por ende la no sostenibilidad.

Además de la problemática socioeconómica, y relacionada en cierta manera con ella por el sistema que defiende, se encuentra la problemática ambiental, con episodios de sequías e inundaciones cada vez más frecuentes en la Península, como las sequías producidas durante los años 2016 y 2017, valles en la serie histórica de nivel de los embalses; o las inundaciones, que en la actualidad constituyen la catástrofe más dañina en España, con cerca de 800 millones anuales en daños producidos. En este sentido, las organizaciones de carácter internacional como las Naciones Unidas presentan una serie de programas que establecen pautas y objetivos para prevenir estos desastres, como se indica textualmente en su informe del Marco de Sendai para la Reducción del Riesgo de Desastres 2015-2030 *“mediante medidas integradas e inclusivas de índole económica, estructural, jurídica, social, sanitaria, cultural, educativa, ambiental, tecnológica, política e institucional”*, es decir, un marco de políticas de gestión integral del agua.

Para concretar la problemática a enfrentar en este TFM, se pueden citar los siguientes problemas específicos:

- Reparto desigual de los recursos hídricos en los territorios que conforman las cuencas, de lo que se deriva los siguientes puntos:
- Sobreutilización de los suelos alrededor de los cursos principales de la cuenca y no utilización de las zonas más alejadas, unido a la concentración de las poblaciones y despoblación en los mismos lugares. Además, esta situación sigue incrementándose en la misma dirección, lo que aumenta el problema de forma exponencial.
- Falta de observación sobre los residuos vertidos a los cursos fluviales y a los suelos conectados con acuíferos que imposibilitan el uso adecuado de los recursos hídricos en las partes bajas de las cuencas tanto por escasez como por pérdida de calidad. Este problema viene asociado, especialmente, al uso de agua de industrias como la alimentaria, la papelera, la textil, la química o la siderúrgica, que, aunque pueden tener una elevada tasa de retorno a los cursos, no lo hacen en las condiciones más apropiadas, con existencia de sustancias contaminantes.



Javier Arto Cuesta

- Ligado con este último punto, se encuentra la problemática de la pérdida de equilibrios biológicos por el desarrollo excesivo de determinadas especies y la desaparición de otras.
- Alteración del régimen hidrológico con la falta de planificación de la actividad en las cuencas y su alteración por elementos como presas y embalses o trasvases.
- Consecuencias derivadas del cambio climático, con procesos extremos que cambian los ciclos hidrológicos y dan lugar a cambios en los procesos de erosión, sedimentación y en el desarrollo biológico, así como el incremento del riesgo para las infraestructuras civiles, especialmente para las hidráulicas. Entre estos procesos se pueden estudiar los casos de inundaciones y sequías, cada vez más abundantes en las cuencas españolas.
- Asociado, a este último punto, también se puede citar el aumento del riesgo para la vida humana y sus bienes materiales, entre ellos, la actividad agrícola.
- Es de especial importancia, el retorno de las aguas de uso doméstico, caracterizadas por abundancia de materia orgánica y elementos patógenos que requiere su procesado antes de poder volver a utilizarse.

De esto, se puede extraer que, básicamente, el problema reside en la incompatibilidad de usos y en su ordenación no planificada, dando prioridad a los aspectos económicos sobre los ambientales.



1.2. MOTIVACIÓN Y OBJETIVO

El objetivo final de este Trabajo de Fin de Máster en Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos es realizar una revisión del actual sistema de políticas de gestión de las cuencas hidrográficas españolas para resolver en cierta medida la problemática anteriormente descrita, a través de generar un programa de optimización de los recursos partiendo de cuenca teórica, caracterizada por unos parámetros que se introducirán como *inputs* y la definición de una serie de hipótesis, de forma que pueda emplearse para el estudio y la optimización de una cuenca real.

Para lograrlo, el primer objetivo parcial será la realización del modelado de la cuenca teórica, mediante la definición de los parámetros a introducir, el estudio de los valores que pueden adoptar y su ponderación.

El siguiente objetivo parcial sería la creación de un programa que optimice los recursos en esta cuenca teórica. Por último, sería necesario comprobar los resultados de este programa en su aplicación a una cuenca real, eligiendo una cuenca española. Para demostrar los resultados obtenidos se hará uso de la cuenca del Segura, por ser una cuenca que presenta limitaciones de recursos en ciertas épocas del año y por dar servicio a una actividad muy diversificada, pudiendo servir de ejemplo para otras cuencas españolas.

Uno de los aspectos que se deben tener en cuenta en el cumplimiento de estos objetivos es que en la definición de los parámetros básicos es importante considerar que, a mayor irregularidad de caudales, mayores serán los costes de la ordenación y gestión de los recursos.

Otros de los objetivos a cumplir en el modelado y optimización de la cuenca será la gestión del agua en los múltiples usos, al tiempo que se trata de minimizar la afección de los fenómenos hidrológicos extremos.

A su vez, se tratará de dar respuesta con este trabajo a dos objetivos que en la actualidad, debido al patrón de consumo que impera en nuestra sociedad, se presentan en ocasiones como opuestos, como son una gestión integrada a nivel económico y ambiental de las cuencas, permitiendo estrategias que supongan una maximización de los beneficios económicos, pero que también implique resultados cuantificables a nivel de mejoras ambientales, a través del conocimiento del efecto de las actuaciones humanas individualmente y en conjunto sobre la cuenca, teniendo como parámetros principales los caudales medios y ecológicos (mínimo a mantener en la cuenca).

Atendiendo a lo anterior, el trabajo pretende situarse en el territorio de los debates del modelo de gestión de los recursos hídricos, pero alejando el foco hacia la generalidad, también en el de los debates sociales y de modelos económicos imperantes en las sociedades actuales. A través de entender cómo se gastan los recursos, cuánto gastamos y en qué lo gastamos se puede fabricar la idea de cuáles son las prioridades de nuestra sociedad y poner en relieve la dualidad de qué futuro queremos frente a qué futuro estamos construyendo.

Para lograr cumplir los objetivos definidos se expone, como ya se mencionó en el capítulo anterior, desde las instituciones y los paneles de expertos el sistema de gestión integral de la cuenca como marco que englobe tanto los aspectos de crecimiento demográfico, las demandas crecientes de agua asociadas a los patrones económicos y sociales, la menor disponibilidad por cuestiones ambientales, como también las mejoras en tecnologías e infraestructuras. Es decir,



un marco de gestión que no disgregue la operación de los elementos del sistema, sino que busque el beneficio conjunto del sistema, el cuál debe estar dotado de una flexibilidad que permita el movimiento de los recursos donde sean necesarios, pero al mismo tiempo mantenga una visión en cuanto a la resolución de problemas con carácter de medio-largo plazo con un marcado desempeño de respeto y cuidado del medioambiente.

Una eficiente gestión de un modelo con estas características permitirá no sólo el beneficio global de la cuenca, sino un beneficio individualizado de cada sector.

Es importante que el sistema de gestión se maneje desde las instituciones, pero al mismo tiempo cuente con la opinión y la participación pública, de modo que se logre un sentimiento de asimilación en la sociedad del problema como propio, pues como expone Elinor Ostrom (*"El gobierno de los bienes comunes"*, 1990), tradicionalmente el diseño de sistemas se ha basado en "[...] dos falacias. La primera es que la mera presencia de un beneficio colectivo es suficiente para asegurar que los individuos se organizarán para obtenerlo. La segunda es que los agricultores a los que no se les asegura un suministro seguro de agua harán inversiones significativas en la provisión".



2. POLÍTICAS DE GESTIÓN DE LOS RECURSOS HÍDRICOS EN ESPAÑA

2.1. EVOLUCIÓN HISTÓRICA

Antecedentes

Los primeros pasos en la gestión de los recursos hídricos en la Península Ibérica provienen de las civilizaciones romanas y árabes, que ocuparon la práctica totalidad del territorio peninsular entre ambas durante casi quince siglos. Un territorio, ya por entonces, caracterizado por la escasez y la heterogeneidad en el reparto de los recursos hídricos.

Las aportaciones de estas civilizaciones a la península se dieron principalmente en el ámbito tecnológico, en particular en la construcción de infraestructuras de abastecimiento tanto para los núcleos poblacionales como para la agricultura, así como de almacenamiento y recogida de aguas.



Ilustración 2: Acueducto de Segovia. Siglo II d.C. Ejemplo de infraestructura hidráulica romana en la Península Ibérica. (Fuente: www.elperiodico.com)

Su contribución también se vio reflejada en el ámbito jurídico y administrativo con instituciones como el Tribunal de Aguas de Valencia, aún activo en la actualidad, que viene tratando los problemas del agua en esa provincia desde la época musulmana del Califato de Córdoba y refinada durante la reconquista cristiana encabezada por el rey Jaime I de Aragón.

Sin embargo, el verdadero desarrollo de la política de gestión hidráulica en España no se dio hasta el siglo XIX, con hitos como el inicio de la consideración de los recursos hidráulicos como públicos a través de la Constitución de 1812, lo que dio pie a tratar como un asunto político y social la gestión del agua, creándose en 1866 la primera Ley del Agua, la cual quedó estancada



por la situación de inestabilidad política en el país. Sin embargo, muchos de los puntos que trataba esta ley pasaron a la Ley de Aguas de 1879, la cual ha estado vigente durante más de un siglo, hasta la aprobación de la Ley de Aguas de 1985.

La Ley de Aguas de 1879 incluyó entre otros aspectos la determinación de las aguas superficiales como bienes de dominio público. Sin embargo, la práctica totalidad de las aguas subterráneas no obtuvieron esta consideración, siendo su propiedad de quién poseyese la tierra en la que se encontraban. Este aspecto dio lugar a que durante cien años la gestión de las aguas subterráneas no estuviese bien controlada por las instituciones.

La Ley de Aguas de 1879 también llevó a cabo una reorganización territorial de la gestión de los recursos, estableciendo las provincias como unidad básica de gestión de los recursos hidráulicos, así como las comunidades de regantes, a las cuales se les otorgó un alto grado de autogobierno. También implantó la concesión administrativa como mecanismo para el aprovechamiento de los recursos públicos.

Esta Ley fue siendo objeto de modificaciones que buscaban adaptarla a los cambios en los patrones económicos, sociales y políticos que fueron llevándose a cabo en España durante el siglo XX. Entre ellos, en 1926 se realiza un cambio de sistema en la organización territorial, pasando de las provincias como unidad base de gestión a la creación de la Confederación Hidrográfica como máximo órgano de planificación y gestión de las cuencas, dando respuesta política a la realidad de las cuencas como elementos físicos y vertebradores del territorio y los recursos.

Este cambio permitió tener una perspectiva más adecuada de cara solventar tanto episodios de sequía como de protección frente a avenidas y a nivel de gestión económica, pues tiene un carácter más amplio que una gestión local, pudiendo tratar los problemas en origen y no únicamente en la zona de afección y más focalizado que lo que pudiese suponer una gestión a nivel provincial, pues las fronteras físicas de las cuencas están más delimitadas que las fronteras administrativas, especialmente cuando los cauces atraviesan varias provincias.

En total se crearon 10 Confederaciones Hidrográficas para abarcar las 10 grandes cuencas estatales o intercomunitaria existentes en la Península: Ebro, Segura, Duero, Júcar, Guadalquivir, Guadiana, Pirineo Oriental, Tajo, Norte y Sur, con el objetivo de estimular la construcción de obras hidráulicas -de forma regulada, estructurada en un Plan- que dieran pie a alcanzar la mayor eficiencia posible en el aprovechamiento de los recursos hidráulicos y buscando el interés general de la cuenca.

Ley de Aguas de 1985 (Ley 29/85)

Sin embargo, la actual definición de las competencias de las Confederaciones Hidrográficas difiere sensiblemente de la que se estableció en la Ley de Aguas de 1879, ajustándose más a lo que se estipuló en la Ley de Aguas de 1985. Esta nueva ley se desarrolló en un contexto social y político muy diferente del que se venía dando en las últimas décadas en España, pues se pasó de un sistema dictatorial de intervencionismo total sobre los bienes hidráulicos con una administración enfocada únicamente en la ejecución de obras hidráulicas a un sistema democrático, con un nuevo sistema socioeconómico que demandaba una gestión más moderna



de los recursos hidráulicos, equiparándose a la gestión que se venía dando en otros países del entorno europeo y ajustando sus principios a los de la Constitución de 1978.

Entre las medidas que incluyó esta nueva ley fue la declaración de todas las aguas también las subterráneas, como bienes de dominio público hidráulico lo que daba pie a su consideración dentro del ciclo hidrológico y a su gestión conjunta y unitaria, aunque en la realidad gran parte de éstas continúan estando en manos privadas.

Esta ley incluía también, de acuerdo con la Constitución, que las competencias del Estado sobre el agua en materia de legislación, ordenación y concesión de recursos y aprovechamientos estarían limitadas a aquellas situaciones en las que la cuenca discurriese por más de una Comunidad Autónoma (Art. 149).

Un hecho fundamental de cara al desarrollo de este TFM es que la Ley de Aguas de 1985 incluyó por vez primera la materia medioambiental en el ámbito legislativo, con atención a la calidad del agua y los vertidos y con el establecimiento en los Planes de Cuenca de la obligatoriedad de mantener un cierto caudal ecológico.

Con la Ley de Aguas de 1985 se crea el *Consejo Nacional del Agua*, que se constituye como una entidad consultiva en la que se engloban tanto a los Organismos de Cuenca, al frente de cuya administración se situaron las Confederaciones Hidrográficas en aquellas cuencas de carácter estatal y las administraciones hidráulicas comunitarias en aquellas cuencas de ámbito intracomunitario donde se hubiesen cedido competencias, como a administraciones públicas y las más notables entidades privadas y profesionales del ámbito hidráulico. El principal objetivo de este órgano es la realización de informes sobre la planificación hidrológica, uno de los cambios más importantes que introduce la ley, pues situará el foco sobre el planeamiento mediante la exigencia a las Confederaciones Hidrográficas de la realización de Planes Hidrológicos específicos para cada una de las cuencas.

Estos Planes que surgen tanto a nivel nacional como de cuenca se crean en un nuevo contexto de actuación conjunta con otros planes sectoriales y con una fuerte componente económica. El Plan Hidrológico Nacional (PHN) buscará la coordinación entre los distintos Planes Hidrológicos de Cuenca confeccionados por las Confederaciones Hidrográficas. Estos últimos buscarán principalmente la protección del DPH, de las aguas y su calidad, satisfaciendo las demandas de agua mediante el mantenimiento del equilibrio en el desarrollo regional y sectorial a nivel económico y medioambiental. Mientras que el objetivo que se establece para el PHN es aprobar los diferentes Planes de Cuenca y llevar a cabo su coordinación, estableciendo cuando así se requiera la necesidad de trasvases de unos a otros.

Aunque la realización del Plan Hidrológico Nacional se establece en la Ley de Aguas de 1985 no es hasta el 2001 cuando se realiza el primero como se verá en el siguiente apartado.

Texto Refundido de la Ley de Aguas (TRLA) de 2001 y Directiva Marco del Agua (DMA)

La Ley de Aguas de 1985 ha venido sufriendo una serie de cambios, que se tradujeron en la aprobación por Real Decreto Legislativo en año 2001 en el conocido como Texto Refundido de la Ley de Aguas, el cual se constituye en la actualidad como la figura fundamental del derecho español en los temas hidráulicos. Aunque la mayor parte de los principios que estableció siguen vigentes, de cara a mejorar su ámbito de actuación y funcionalidad, a lo largo de los años

también se ha visto modificado en varias ocasiones, principalmente por la adaptación a los principios que nos rigen por ser un país miembro de la Unión Europea, recogidos en la Directiva Marco del Agua (DMA) y a los Estatutos de Autonomía.

Muchas de las medidas que se adoptaron en diciembre del año 2000, con motivo de la entrada en vigor de la DMA, estaban relacionados con la consecución de objetivos medioambientales, lo cual tuvo gran repercusión sobre los aspectos tratados en la Ley de Aguas de 1985 y que llevaron al TRLA en 2001, como el caso del primer Plan Hidrológico Nacional, del año 2001, que tuvo que ser modificado en el año 2005 por su alto carácter de intervención a través de grandes obras hidráulicas, obviando los matices medioambientales (caso del derogado trasvase Ebro-Júcar/Segura).

Otra de las novedades que incluyó la DMA fue el establecimiento de las demarcaciones hidrográficas, correspondiente al territorio perteneciente a una o varias cuencas hidrográficas vecinas y sus aguas de transición, subterráneas y costeras, ajustándose además como indica el RD 125/207 *“a la estructura organizativa y de división competencial entre el Estado y las Comunidades Autónomas”*, pues tal y como se puede observar en la siguiente figura, existe una cierta similitud entre el Estado de las Autonomías y la división hidráulica establecida por las demarcaciones.



Ilustración 3: Demarcaciones hidrográficas en España (Fuente: www.miteco.gob)



2.2. SITUACIÓN ACTUAL DEL SISTEMA DE GESTIÓN

2.2.1. Sistema de gestión

Todos los aspectos vistos en el capítulo anterior han desembocado en el actual sistema de gestión de los recursos hídricos. Las características principales que lo definen son las siguientes:

- La gestión del agua en España se realiza mediante un doble sistema: *en alta*, que se encarga de su traslado desde las captaciones, plantas de tratamiento y canalizaciones hasta los depósitos de cabecera y *en baja*, que gestiona el agua desde los depósitos de cabecera a los usuarios y su posterior recogida y tratamiento.

Gestión en alta

- La gestión *en alta* es llevada a cabo por los organismos estatales públicos. En este sistema la **Demarcación Hidrográfica** se establece como la unidad de gestión de la cuenca o cuencas vecinas, siendo éstas las unidades primarias o básicas de gestión, diferenciándose entre **intercomunitarias** (más de una CA) e **intracomunitarias** (una sola CA).
- La **Dirección General del Agua** es el organismo superior encargado de las políticas hídricas en España, siendo responsable de la aprobación de los Planes de Gestión de las Demarcaciones Hidrográficas, tal y como establece la DMA. La Dirección General del Agua depende de la **Secretaría de Estado de Medio Ambiente**, que a su vez es un organismo perteneciente al **Ministerio para la Transición Ecológica**. Es decir, la Dirección General del Agua sería un organismo puramente estatal.
- Además, los **Organismos de Cuenca**, denominados como **Confederaciones Hidrográficas** son los entes públicos, con carácter independiente, que se encargan de la gestión de los cursos fluviales, llevando a cabo el estudio de las inversiones a realizar y la operación de las infraestructuras que afectan a las cuencas. A continuación, se detallan todas sus funciones:
 - o La realización y seguimiento de los PHC y la administración y control del DPH, y de los aprovechamientos de interés general o intercomunitarios.
 - o El proyecto, la construcción y la explotación de las obras hidráulicas financiadas por el Organismo y de las encargadas por el Estado u otras administraciones y entes públicos o privados.
 - o Podrán conceder autorizaciones y concesiones en el DPH, excepto en obras de interés general y realizarán el control de aquéllas.
 - o La realización de estudios hidrológicos (avenidas, calidad, aforos).
- Por otro lado, existe el **Consejo Nacional del Agua**, el órgano consultivo superior, que está formado por agentes tanto públicos como privados como se verá más adelante - influyendo los privados, esencialmente, en la gestión en baja- y cuyas funciones principales son (CEDEX, 2019):
 - o El proyecto del Plan Hidrológico Nacional
 - o Los Planes Hidrológicos de Cuenca
 - o Los proyectos de carácter general de aplicación en todo el territorio nacional relativas a la protección de las aguas y a la ordenación del DPH.



- Los planes y proyectos de interés general de ordenación agraria, urbana, industrial y de aprovechamientos energéticos o de ordenación del territorio, antes de su aprobación por el Gobierno.
 - Las cuestiones comunes a dos o más organismos de cuenca en relación con el aprovechamiento de recursos hídricos y demás bienes del DPH.
 - Las cuestiones relacionadas con el DPH que pudieran serle consultadas por el Gobierno o por los órganos ejecutivos superiores de las comunidades autónomas.
 - Proponer a los organismos públicos líneas de investigación referentes al DPH.
- Además, como organismo nexo se generó con el Texto Refundido de la Ley de Aguas el **Comité de Autoridades Competentes**, que realiza funciones de coordinación en las demarcaciones hidrográficas con cuencas intercomunitarias. Estas funciones son principalmente:
- Coordinar la cooperación de las Administraciones en materia de protección de aguas.
 - Impulsar el cumplimiento de las medidas dispuestas en el Texto Refundido de la Ley de Aguas por parte de las Administraciones Públicas.
 - Proporcionar a la UE la información que solicite referente a las demarcaciones hidrográficas.

Gestión en baja

En cuanto a la gestión en baja, se trasladan las competencias de abastecimiento y saneamiento a organismos de carácter local, pero con una alta dependencia de los organismos estatales por tener estas operaciones un marcado carácter medioambiental. También participa activamente en esta gestión el sector privado con participación en el Consejo Nacional del Agua y con su prestación de servicios al usuario final, puesto que muchas de las funciones ligadas a la gestión en baja son prestadas mediante concesión por parte de empresas privadas. En particular, en el caso del abastecimiento, el servicio es prestado en un 60% por empresas privadas concesionarias de estas funciones, tales como Aguas de Barcelona (Grupo Agbar) que congrega el 50% de las concesiones.

Si atendemos únicamente a la materia competencial, la distribución sería la siguiente:

- Estado:
 - Legislación y ordenación de los recursos cuando transcurran por cuencas intercomunitarias y autorización de instalaciones eléctricas que afecten a otras comunidades o el transporte de energía salga de la comunidad.
 - Obras públicas de interés general o afecten a más de una CA.
 - Legislación sobre medio ambiente.
- CCAA



- Proyectos, construcción y explotación de aprovechamientos, canales y regadíos dentro de la propia comunidad, así competencias sobre las aguas minerales y termales.
- Pesca, marisqueo, acuicultura y pesca en aguas interiores
- Gestión en materia de medio ambiente y legislación adicional y complementaria.

Este marco conjunto, está particularizado por una serie de aspectos, que como se verán más adelante en el epígrafe de la problemática, marcan un funcionamiento con un cierto grado de mejora, derivado básicamente de tres aspectos:

1. A pesar de que con la organización a través del sistema de demarcaciones-cuencas se logra una cierta autonomía en la gestión del agua en España, la situación entre cuencas presenta grandes diferencias, tanto por la desigualdad de recursos que disponen como por la propia situación económica de las zonas que cubren.
2. Los recursos económicos que disponen los organismos de cuenca son limitados y, en ocasiones, escasos para cumplir con sus propósitos y dar cabida a todas las actuaciones necesarias para el funcionamiento óptimo de la cuenca. Además, el foco de la rentabilidad se pone muchas veces sobre las actuaciones de los organismos privados, pero también sobre las de los organismos públicos, fomentando que se consideren los aspectos económicos como los únicos importantes, devaluando otros de gran relevancia como los medioambientales o la justa distribución de los recursos.
3. La planificación de las cuencas, ligada en gran parte al punto anterior, es insuficiente y se ve afectada por fenómenos de difícil previsión. Este párrafo hace referencia a la ineficiencia en el desarrollo de la planificación por la falta de recursos económicos de los organismos de cuenca, que conlleva a su vez escasez de recursos humanos que puedan realizar un trabajo más meditado y preciso en la gestión de los recursos hídricos. Ligado a ello se menciona el hecho de que la planificación de las cuencas se ve afectada en ocasiones por fenómenos como inundaciones o sequías con carácter repentino, a los cuales es difícil dar una respuesta.

2.2.2. Normativa

El marco de gestión anteriormente descrito, con un desarrollo milenario hasta desembocar en el presente sistema, ha generado para su correcto funcionamiento actual, un complejo y numeroso entramado de normas, regulaciones y leyes que abarcan todos los aspectos de la gestión del agua, desde su planificación, establecimiento de cánones, pasando por otras normativas de tratamiento y aseguramiento de la calidad o de regulación de organismos.

El BOE recoge en la actualidad la siguiente normativa relativa al agua en el Código de Aguas:

Ámbito territorial general

1. RDL 1/2001, de 20 de julio, por el que se aprueba el texto refundido de la Ley de Aguas.

Dominio Público Hidráulico



2. RD 849/1986, de 11 de abril, por el que se aprueba el Reglamento del Dominio Público Hidráulico, que desarrolla los títulos preliminar I, IV, V, VI y VII de la Ley 29/1985, de 2 de agosto, de Aguas.
3. RD 927/1988, de 29 de julio, por el que se aprueba el Reglamento de la Administración Pública del Agua y de la Planificación Hidrológica, en desarrollo de los títulos II y III de la Ley de Aguas.
4. RD 198/2015, de 23 de marzo, por el que se desarrolla el artículo 112 bis del texto refundido de la Ley de Aguas y se regula el canon por utilización de las aguas continentales para la producción de energía eléctrica en las demarcaciones intercomunitarias.

Demarcaciones Hidrográficas

5. RD 125/2007, de 2 de febrero, por el que se fija el ámbito territorial de las demarcaciones hidrográficas.
6. RD 126/2007, de 2 de febrero, por el que se regulan la composición, funcionamiento y atribuciones de los comités de autoridades competentes de las demarcaciones hidrográficas con cuencas intercomunitarias.
7. RD 1364/2011, de 7 de octubre, por el que se establece la composición, estructura y funcionamiento del Consejo del Agua de la demarcación de la parte española de la Demarcación Hidrográfica del Duero.
8. RD 1365/2011, de 7 de octubre, por el que se establece la composición, estructura y funcionamiento del Consejo del Agua de la demarcación de la parte española de la Demarcación Hidrográfica del Miño-Sil.
9. RD 1366/2011, de 7 de octubre, por el que se establece la composición, estructura y funcionamiento del Consejo del Agua de la demarcación de la parte española de la Demarcación Hidrográfica del Ebro.
10. RD 1389/2011, de 14 de octubre, por el que se establece la composición, estructura y funcionamiento del Consejo del Agua de la demarcación de la parte española de la Demarcación Hidrográfica del Guadiana y por el que se modifica el Real Decreto 650/1987, de 8 de mayo, por el que se definen los ámbitos territoriales de los organismos de cuenca y de los planes hidrológicos.
11. RD 1598/2011, de 4 de noviembre, por el que se establece la composición, estructura y funcionamiento del Consejo del Agua de la Demarcación Hidrográfica del Guadalquivir y por el que se modifica el Real Decreto 650/1987, de 8 de mayo, por el que se definen los ámbitos territoriales de los organismos de cuenca y de los planes hidrológicos.
12. RD 1626/2011, de 14 de noviembre, por el que se establece la composición, estructura y funcionamiento del Consejo del Agua de la Demarcación Hidrográfica del Cantábrico Occidental y por el que se modifica el Real Decreto 126/2007, de 2 de febrero, por el que se regulan la composición, funcionamiento y atribuciones de los comités de autoridades competentes de las Demarcaciones Hidrográficas con cuencas intercomunitarias.
13. RD 1627/2011, de 14 de noviembre, por el que se establece la composición, estructura y funcionamiento del Consejo del Agua del ámbito de competencia estatal de la parte española de la Demarcación Hidrográfica del Cantábrico Oriental.
14. RD 1704/2011, de 18 de noviembre, por el que se establece la composición, estructura y funcionamiento del Consejo del Agua de la demarcación de la parte española de la Demarcación Hidrográfica del Tago.



15. RD 1705/2011, de 18 de noviembre, por el que se establece la composición, estructura y funcionamiento del Consejo del Agua de la Demarcación Hidrográfica del Segura.
16. RD 255/2013, de 12 de abril, por el que se establece la composición, estructura y funcionamiento del Consejo del Agua de la Demarcación Hidrográfica del Júcar y por el que se modifican diversas normas relativas al ámbito y constitución de dicha demarcación hidrográfica y de la Confederación Hidrográfica del Júcar.
17. RD 295/2013, de 26 de abril, por el que se establece la composición, estructura y funcionamiento del Consejo del Agua de la Demarcación Hidrográfica de Ceuta.
18. RD 296/2013, de 26 de abril, por el que se establece la composición, estructura y funcionamiento del Consejo del Agua de la Demarcación Hidrográfica de Melilla.

Planificación hidrológica

19. Ley 10/2001, de 5 de julio, del Plan Hidrológico Nacional.
20. RD 907/2007, de 6 de julio, por el que se aprueba el Reglamento de la Planificación Hidrológica.
21. RD 650/1987, de 8 de mayo, por el que se definen los ámbitos territoriales de los Organismos de cuenca y de los planes hidrológicos.
22. Orden TEC/921/2018, de 30 de agosto, por la que se definen las líneas que indican los límites cartográficos principales de los ámbitos territoriales de las Confederaciones Hidrográficas de acuerdo con lo establecido en el Real Decreto 650/1987, de 8 de mayo, por el que se definen los ámbitos territoriales de los organismos de cuenca y de los planes hidrológicos.
23. RD 701/2015, de 17 de julio, por el que se aprueba el Plan Hidrológico de la Demarcación Hidrográfica de las Illes Balears.
24. RD 1/2016, de 8 de enero, por el que se aprueba la revisión de los Planes Hidrológicos de las demarcaciones hidrográficas del Cantábrico Occidental, Guadalquivir, Ceuta, Melilla, Segura y Júcar, y de la parte española de las demarcaciones hidrográficas del Cantábrico Oriental, Miño-Sil, Duero, Tajo, Gadiana y Ebro.
25. RD 11/2016, de 8 de enero, por el que se aprueban los Planes Hidrológicos de las demarcaciones hidrográficas de Galicia-Costa, de las Cuencas Mediterráneas Andaluzas, del Guadalete y Barbate y del Tinto, Odiel y Piedras.
26. RD 450/2017, de 5 de mayo, por el que se aprueba el Plan de gestión del distrito de cuenca fluvial de Cataluña.

Calidad de las aguas

27. RD 817/2015, de 11 de septiembre, por el que se establecen los criterios de seguimiento y evaluación del estado de las aguas superficiales y las normas de calidad ambiental.
28. RD-ley 11/1995, de 28 de diciembre, por el que se establecen las normas aplicables al tratamiento de las aguas residuales urbanas.
29. RD 509/1996, de 15 de marzo, de desarrollo del RD-ley 11/1995, de 28 de diciembre, por el que se establecen las normas aplicables al tratamiento de las aguas residuales urbanas.
30. RD 1341/2007, de 11 de octubre, sobre la gestión de la calidad de las aguas de baño.
31. RD 140/2003, de 7 de febrero, por el que se establecen los criterios sanitarios de la calidad del agua de consumo humano.



32. RD 261/1996, de 16 de febrero, sobre protección de las aguas contra la contaminación producida por los nitratos procedentes de fuentes agrarias.
33. RD 1620/2007, de 7 de diciembre, por el que se establece el régimen jurídico de la reutilización de las aguas depuradas.
34. RD 1514/2009, de 2 de octubre, por el que se regula la protección de las aguas subterráneas contra la contaminación y el deterioro.

Otras normas relacionadas

35. RD 903/2010, de 9 de julio, de evaluación y gestión de riesgos de inundación.
36. RD 2090/2008, de 22 de diciembre, por el que se aprueba el Reglamento de desarrollo parcial de la Ley 26/2007, de 23 de octubre, de Responsabilidad Medioambiental.
37. Ley 22/1988, de 28 de julio, de Costas.
38. Ley 2/2013, de 29 de mayo, de protección y uso sostenible del litoral y de modificación de la Ley 22/1988, de 28 de julio, de Costas.
39. Ley 42/2007, de 13 de diciembre, del Patrimonio Natural y de la Biodiversidad.
40. RD-ley 17/2012, de 4 de mayo, de medidas urgentes en materia de medio ambiente.
41. Ley 27/2006, de 18 de julio, por la que se regulan los derechos de acceso a la información, de participación pública y de acceso a la justicia en materia de medio ambiente (incorpora las Directivas 2003/4/CE y 2003/35/CE).
42. RD 822/2008, de 16 de mayo, por el que se crea la Oficina del Fondo de Cooperación para Agua y Saneamiento.
43. RD 2618/1986, de 24 de diciembre, por el que se aprueban medidas referentes a acuíferos subterráneos al amparo del artículo 56 de la Ley de Aguas.
44. Ley 1/2018, de 6 de marzo, por la que se adoptan medidas urgentes para paliar los efectos producidos por la sequía en determinadas cuencas hidrográficas y se modifica el texto refundido de la Ley de Aguas, aprobado por Real Decreto Legislativo 1/2001, de 20 de julio.

Se muestra a continuación un resumen con la normativa y conceptos de mayor importancia para la ejecución de este trabajo:



Tabla 1: Principales normas reguladoras (Fuente: elaboración propia. Datos BOE)

NORMATIVA	CONCEPTOS QUE ABARCA
RDL 1/2001	Aprueba el Texto Refundido de la Ley de Aguas, la normativa básica del agua en España. Trata lo relativo al DPH y su utilización (a nivel funcional, económico y de sanciones), las obras públicas hidráulicas y la planificación hidrológica.
RD 125/2007	Define el concepto de Demarcación Hidrográfica, delimitándolo territorialmente, especialmente en los casos de las cuencas compartidas con otros países.
RD 1705/2011	Establece el Consejo del Agua de la DH del Segura. Es destacable para entender el funcionamiento de la cuenca elegida como caso práctico en este trabajo.
Ley 10/2001	Plan Hidrológico Nacional. Coordina, regula y delimita los PHC y las aguas compartidas entre demarcaciones, para gestionar de forma eficiente y satisfactoria los recursos hídricos ofertados y demandados por la población.
RD 1/2016	Ligado a los dos anteriores, pues aprueba el Plan Hidrológico de la Cuenca del Segura, definiendo las masas de agua existentes y sus sistemas de explotación, así como los órdenes de preferencia de los mismos: (1). Uso de abastecimiento de población; (2). Usos agropecuarios y usos industriales distintos de la producción de energía eléctrica; (3). Usos industriales para producción de energía eléctrica. (4). Acuicultura. (5). Otros. Establece también los caudales ecológicos y su control. Además, abarca los Planes de Sequía, las zonas protegidas y las medidas de protección
RD 817/2015	Sobre la calidad del agua. Establece los criterios que deben tener los programas de seguimiento de las masas de agua, las normas de calidad ambiental de las sustancias para lograr un buen estado ecológico de las aguas superficiales. Asimismo, establece las condiciones de referencia y los límites de los indicadores de calidad.
RD 140/2003	Establece los criterios sanitarios que deben cumplir las aguas de consumo humano y las instalaciones de abastecimiento, así como su control.
RD 1620/2007	Regula la reutilización de aguas: usos permitidos, criterios de calidad, procedimientos y contratos de concesiones.



3. OBTENCIÓN DEL MODELO

3.1. METODOLOGÍA Y HERRAMIENTAS

Como ya se ha comentado en el capítulo de objetivos de este trabajo, la metodología a seguir para darles cumplimiento está basada en una serie de hitos parciales.

En primer lugar, se realizará un modelo de una cuenca teórica que sirva de base de pruebas para la optimización de los casos reales. Es necesario para la definición de este modelo teórico el estudio y la observación de las diversas cuencas existentes en España, de cara a poder profundizar en los aspectos que las definen, como cuáles son las fuentes y sumideros de los recursos hídricos, qué actividades están presentes en las cuencas y a raíz de ello la caracterización de aquéllas que permiten una reutilización total o parcial del agua o cuáles revierten en su totalidad a las redes de saneamiento, sin posibilidad de reutilización. También será necesario definir qué costes y qué beneficios suponen tanto a nivel económico como medioambiental el mantenimiento de ciertos caudales en las cuencas o su aprovechamiento en las actividades que se desarrollan en su curso.

Una vez definido el modelo teórico básico, dado que este trabajo busca una optimización de los recursos en la cuenca, es necesario hacer uso de herramientas matemáticas para lograr maximizar los recursos.

Se ha decidido utilizar la **programación lineal** para realizar el tratamiento matemático del problema. Esta herramienta está basada en la definición de una **función objetivo**, que representará en su definición los parámetros que integran aquello que queremos optimizar. Para definir el problema, será necesario aplicar una serie de **condiciones de contorno** o **restricciones** que limiten el problema, las cuales deberán ser mayores o iguales que cero por definición.

Cuando se obtiene una solución que cumple las restricciones se obtendrá una **solución factible**. Sin embargo, pueden ser numerosas las soluciones factibles obtenidas, mientras que lo que se busca en este trabajo es la función que optimice el objetivo, lo que se conoce como **solución óptima**.

La decisión de emplear la programación lineal se fundamenta en el hecho de que la relación ponderada de las variables que se consideran puede tratarse con cierta sencillez, una vez es entendida su contribución a la función objetivo, lo cual no debe presentar gran dificultad pues se realizará a partir de unos valores de referencia fabricados a partir de ejemplos reales.

Además, la programación lineal, como se ha indicado en los párrafos anteriores busca maximizar la función objetivo, lo cual permitirá entender, para las diferentes hipótesis, el grado de afección de las variables individualmente al problema a través de la variación de la función objetivo anteriormente mencionada.

Por otro lado, presenta una alta operatividad para los objetivos que persigue este trabajo, pues permite reevaluar los procesos a través de la variación de las condiciones de contorno con relativa facilidad.

Sin embargo, la propia definición de lineal también implica una serie de restricciones a la hora de modelar:



- La linealidad implica que las variables tendrán un peso en la función objetivo proporcional a su propio valor y esta relación sólo vendrá determinada por la contribución definida para cada variable.
- Cada variable actúa independientemente de las otras en la función objetivo. No se pueden crear relaciones entre variables, sino que cada variable a_i se encuentra afectada por su propio coeficiente x_i :

$$x1 * a1 + x2 * a2 + ...$$

- Para la definición del problema es necesario conocer los coeficientes en las ecuaciones. Con el desconocimiento de dichos datos las hipótesis pueden alejarse en gran medida de la realidad.
- Únicamente permite la definición de una función objetivo, que se establecerá en una única unidad de medida. Esta limitación otorga sencillez a la hora de entender el grado de afección de las variables al problema, pero no permite el estudio de beneficios en distintos rangos. En el caso de este trabajo, no permite un estudio de la optimización a nivel económico y a nivel ambiental simultáneamente, sino que es necesario elegir un sistema de comparación entre escenarios y asumir el resto de los horizontes como restricciones al problema mediante su transformación a la unidad de medida elegida.
- La problemática anterior es extrapolable también a la repercusión que la variable tiempo puede tener en el problema, pues se trata de un método estática. Para la resolución de problemas en los que intervenga el tiempo es necesario presentar diferentes escenarios y compararlos, pero no podrá formar parte de las ecuaciones, salvo que se determine como unidad de medida.
- Por último, hay que entender que a medida que se añaden más variables al problema, la complejidad puede crecer en exceso y asumiendo cada vez más relaciones lineales entre variables que pueden estar interrelacionadas, siendo difícilmente resolubles mediante programación lineal y presentando cada vez mayor error.

Estas restricciones condicionan en ciertos aspectos de la definición del trabajo, en el cual las variables ambientales pueden verse reducidas al establecimiento de condiciones de contorno definidas por el mantenimiento de los caudales mínimos en las cuencas y en el cual será necesario la comparación de diferentes escenarios para entender las variaciones estacionales en la cuenca.

Existen otros métodos matemáticos que podrían haber sido factibles en la resolución de problemas como el presentado en este trabajo. Entre ellas podría destacarse el método de **simulación heurística**, basado en la presentación de soluciones basadas en la invención, en las que la experiencia del diseñador es clave. Si bien este método permite obtener muchas soluciones factibles puede no llegar a alcanzar la solución óptima, por lo que perdería cierto interés para el caso a abordar.

Otra de las metodologías que podría haberse aceptado para la resolución de este problema es la **programación no lineal**, en la cual tanto la función objetivo como las restricciones pueden no basarse en la linealidad. Si bien este método puede ser más preciso, por permitir la definición de las variables no lineales con más precisión, también añade un grado de dificultad mucho mayor al problema, siendo necesario el empleo de algoritmos como el MAP (*Method of Approximating Programming*) que requiere de aproximación a las funciones no lineales



haciendo uso de funciones lineales, aceptando las soluciones únicamente en los entornos del punto de aproximación.

Otra alternativa a la programación lineal habría sido la **optimización estocástica**, basadas en la introducción de variables aleatorias al sistema, lo cuál podría ser útil, por ejemplo, definiendo las entradas de caudal a la cuenca en función las precipitaciones considerando éstas una variable aleatoria. Sin embargo, esta alternativa se sustituye en este trabajo por programación lineal aceptando los valores de entradas de aguas como valores medios de las precipitaciones, lo cual, si bien puede alejarse de una solución real determinada, se encontrará dentro de los patrones de comportamiento comunes de la cuenca.

En cuanto al soporte de software para realizar la optimización se utilizará el programa R®, un entorno y lenguaje de programación libre empleado especialmente en el campo de la estadística, apoyado en el paquete CPLEX de optimización que se definirá más adelante en el trabajo.

El modelo obtenido, optimizado y tras un proceso de refinado servirá para realizar un primer análisis de resultados obtenidos que permitan observar el grado de cumplimiento de los objetivos marcados en este trabajo. Una vez se considere adecuado, se aplicarán al modelo los inputs de la cuenca del Segura, elegida caso de estudio para confirmar la validez de los resultados.



3.2. MODELO TEÓRICO DE CUENCA

3.2.1. Diseño inicial del modelo

En primer lugar, es necesario definir las actividades principales que demandan agua en las cuencas hidrográficas de cara a incluirlas como **inputs demandantes** en el modelo teórico. Éstas son:

- Poblaciones: requieren recursos para el abastecimiento humano de uso doméstico, público y comercial. Es conveniente considerar que esta demanda no será igual a lo largo del año, pues hay que tener en cuenta los incrementos estacionales debidos al turismo.
- Industrias: para el desarrollo de su actividad en procesos.
- Agrícola: para riego y necesidades de uso ganadero
- Otros: generación de energía y ocio

Por otro lado, como **inputs generadores** de recursos se establecerá de cara a simplificar el modelo teórico, únicamente un **caudal inicial**, el cuál será superior al **caudal ecológico** que se debe mantener en todo momento en la cuenca.

Además, las actividades tendrán un coeficiente de retorno al curso principal que será necesario valorar.

Se muestra continuación un esquema inicial de la posible cuenca teórica a modelar. Para ello, se definen en primer lugar los puntos de consumo. Para crear un modelo teórico simplificado se consideran únicamente los siguientes elementos:

- Ciudad 1 → C1
- Industria 1 → I1
- Regadío 1 → R1
- Ocio 1 → O1 (Se considerará sin retorno a la red)

Se diseña la cuenca simulando las cuencas teóricas reales, con las demandas agrarias en las partes altas de las ciudades y concentrándose poblaciones e industrias en las partes bajas.

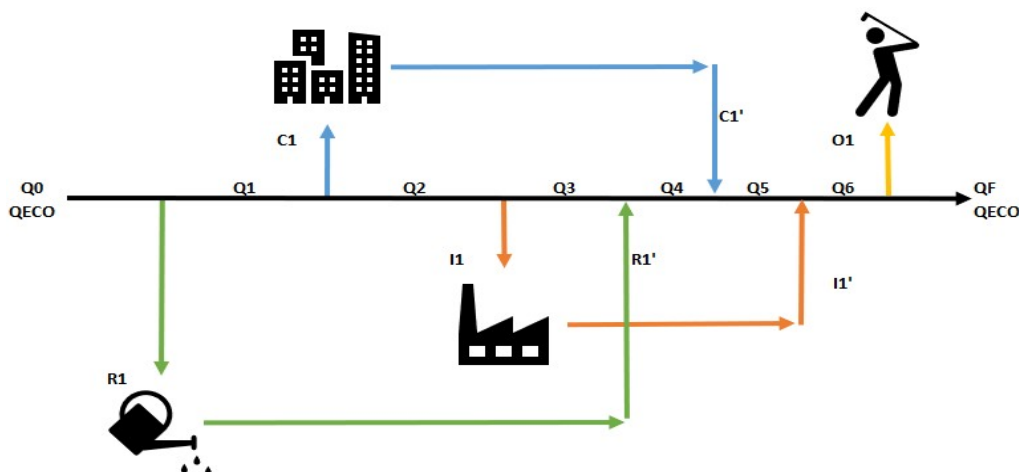


Ilustración 4: Esquema teórico de cuenca (Fuente: elaboración propia)



Si los caudales de esta cuenca se definen mediante ecuaciones, serían los siguientes:

- $Q_0 = Q_1 + R_1 \geq Q_{ECO}$
- $Q_1 = Q_2 + C_1 \geq Q_{ECO}$
- $Q_2 = Q_3 + I_1 \geq Q_{ECO}$
- $Q_3 = Q_4 - R_1' \geq Q_{ECO}$
- $Q_4 = Q_5 - C_1' \geq Q_{ECO}$
- $Q_5 = Q_6 - I_1' \geq Q_{ECO}$
- $Q_6 = Q_F + O_1 \geq Q_{ECO}$

Es necesario ahora realizar un análisis cuantitativo de los ingresos y costes que supone en la cuenca el uso del agua. Para ello, es necesario transformar cada uno de los consumos y procesos a términos económicos. A continuación, se realizará esta transformación para cada uno los *inputs consumidores* de recursos hídricos a través de la definición de sus características, de forma que se disponga de un parámetro comparador común entre todos. A raíz de los resultados obtenidos y de las características estudiadas para cada uno de los sectores estudiados se rediseñará la cuenca para que se ajuste de forma más real a una cuenca existente.

3.2.2. Definición y características de la cuenca teórica

Ciudad, C1

Dado que la ciudad que se define es concentradora de toda la población ubicada en la cuenca hidrográfica, se decide caracterizar de forma que promedie la población total en España (46 millones de habitantes) entre el número de cuencas existentes (15), aproximando esta población a 3 millones de habitantes.

Además, según los datos del INE el volumen de agua suministrada anualmente a los hogares españoles es de 2.238 hm³. Sin embargo, es necesario incluir en este cómputo también el volumen de pérdidas en la red y el uso de agua para servicios urbanos, incrementando el valor del agua registrada para abastecimiento urbano anualmente en España en 4.324 hm³, lo que realizando un promedio equivaldría a un consumo de 260 litros/habitante/día, superior al valor que establece la OMS como dotación mínima de 70 litros/habitante/día para beber, cocinar, higiene, lavado de ropa y del hogar y saneamiento. Dentro de la cuenca teórica esto supone un consumo anual de agua en la ciudad C1 de 285 hm³/año. De esta cantidad de agua necesaria, el 67% proviene de aguas superficiales, el 30% de subterráneas y el 3% restante de desalación.

Hay que tener en cuenta que esta hipótesis no considera ciertos factores, de forma que se distorsiona la realidad, pues una ciudad del tamaño de la definida tendría un consumo por habitante mucho menor al calculado por la eficiencia de las redes en las grandes urbes, donde a partir de 100.000 habitantes el consumo medio es de 107 l/hab./día y las de menos de 100.000 asciende hasta 170 l/hab./día (sin tener en cuenta el resto de dotaciones urbanas y las pérdidas en la red).

Para el cálculo de los ingresos, es necesario su paso a términos económicos que se decide realizar teniendo en cuenta la contribución per cápita de las empresas de abastecimiento y saneamiento al PIB nacional. En España el importe facturado para el agua urbana por estas



empresas según la Asociación Española de Abastecimiento y Saneamiento, AEAS es de 6.500 millones de euros, que suponen el 0,6% del PIB nacional, perteneciendo el 60% al abastecimiento, el 23 % a depuración, el 12,5 % a alcantarillado y el 4,5% restante a otros conceptos como contadores. A efectos de la cuenca modelada el importe que le correspondería sería de aproximadamente 424 millones de euros.

En cuanto al coste, se va a calcular multiplicando el consumo medio por persona aplicando la tarifa promedio en España, que es de 1,77 €/m³. Se ha decidido optar por el valor promedio porque el caso real tiene una gran variabilidad en función de la zona de estudio elegida, como se puede ver en la siguiente imagen, donde se muestra la variación del importe pagado por abastecimiento en las diferentes comunidades autónomas en relación con los diferentes orígenes del recurso:

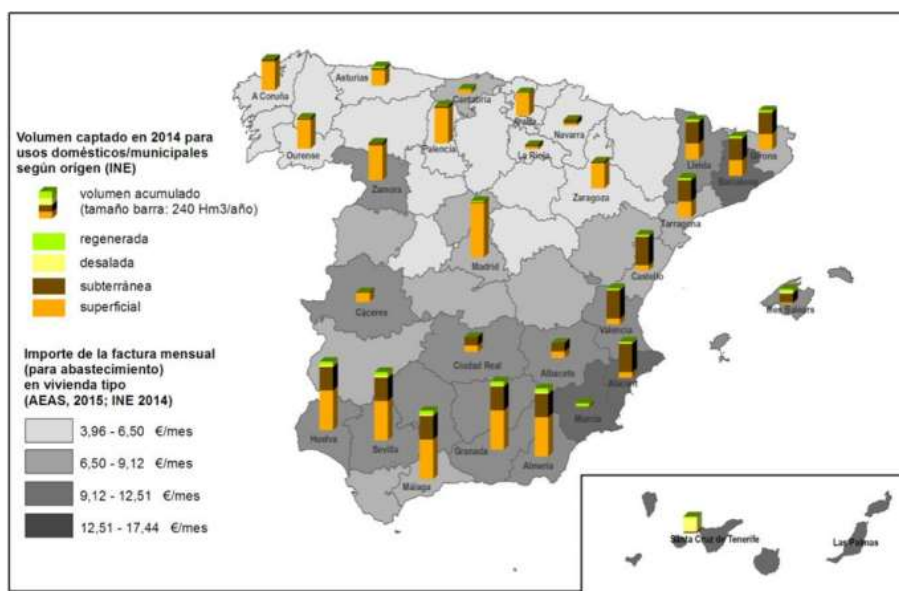


Ilustración 5: Importe del abastecimiento en España en función de las fuentes disponibles (Fuente: "El sector del abastecimiento y el saneamiento en España", Fundación Canal de Isabel II, 2017)

Por lo tanto, a la vista de lo anterior el coste anual en la cuenca teórica modelada de la ciudad C1 sería de:

$$1,77 \text{ €/m}^3 * 284,7 \text{ hm}^3/\text{hab} = 503.919.000 \text{ €}$$

De cara a la optimización posterior, es necesario conocer para comprender los rendimientos del sistema que, para proporcionar el abastecimiento, el 10% del servicio prestado viene de los servicios municipales, el 34% es prestado por entidades públicas, otro 22% por empresas mixtas y el restante 34% por empresas privadas (AEAS-AGA, 2016). En cuanto a los servicios de depuración de aguas, el 6% es realizado por los servicios municipales, el 65% por entidades públicas, el 8% por empresas mixtas y el 21% es servido por empresas privadas. Por otro lado, en la gestión, la balanza está mucho más descompensada, pues más del 80% de la gestión la realizan empresas privadas.



Es necesario tener en cuenta también que, según el artículo 60 del TRLA, el abastecimiento a la población es la prioridad legal absoluta para el uso del agua en España. Es decir, en caso de ausencia de recursos hídricos para todos los usos, como es lógico, la prioridad siempre sería el abastecimiento de la población.

Industria, I1

El sector industrial supone un punto clave en la realización de este trabajo, pues junto con el turismo son los dos sectores con más rentabilidad, alcanzando una productividad por metro cúbico de 100 €. Dado que la cantidad total utilizada en los procesos industriales en España es de 965 hm³ anuales, el valor en la cuenca teórica del consumo de agua industrial ascendería a 65 hm³, el tercer puesto en cuanto al consumo por sectores, y los ingresos obtenidos a 6.500 millones de euros en la cuenca.

En cuanto al coste, el valor de la tarifa hidráulica industrial promedio es de 2,35 €/m³, lo que en la cuenca teórica equivale a tener un coste en el sector de 153 millones de euros.

Posteriormente, se evaluará el retorno a la red de los recursos hídricos, para lo cual es necesario entender que la composición de contaminantes de cada proceso industrial es diferente y, por lo tanto, su reutilización puede verse afectada por la calidad de las aguas emitidas, especialmente en los casos de las industrias alimentarias y químicas, mientras que otras como la generación energética apenas tienen afección sobre la calidad del agua.

Regadío, R1

El cálculo del empleo de agua en el uso agrícola en España podría hacerse a través de la superficie de tierra cultivable con la que cuenta España, que alcanza un valor de 261.000 km², lo que para la cuenca teórica equivaldría a una superficie cultivable de 17.400 km². Si a este valor lo multiplicamos por el volumen de agua utilizada por unidad de superficie para uso agrícola tendríamos la cantidad de agua total empleada. Este valor, sin embargo, es difícil de determinar por la gran variedad de cultivos y técnicas que se emplean en España. Afortunadamente, el Instituto Nacional de Estadística español ofrece los datos totales de agua empleado en la agricultura, que alcanza un valor de 15.800 hm³, distinguiéndose como el mayor consumidor de agua entre los diferentes sectores. Este valor, escalado a nivel de la cuenca teórica equivaldría a 1.053 hm³.

Para evaluar los ingresos obtenidos a través del agua empleada en la agricultura se va a calcular en términos económicos a través de la productividad. Para ello, es necesario conocer los valores de productividad en las cuencas españolas. Los valores extremos corresponderían a ciertas zonas de las cuencas mediterráneas y de Andalucía donde se alcanza una productividad máxima en la agricultura de 1,75€/ m³ y, por el contrario, la productividad mínima se da en la cuenca del Duero, donde su valor es únicamente de 0,14 €/m³, con un valor medio de aproximadamente 1 €/m³.

Por lo tanto, el valor de los ingresos producidos por los recursos hídricos en la cuenca teórica sería de 1.053 millones de euros.



Por otro lado, el coste se realizaría a través del precio promedio que pagan los agricultores por volumen de agua. Este precio promedio es de 0,17 €/m³. Es interesante considerar que, por un suministro asegurado, los agricultores estarían dispuestos a pagar hasta 0,35 €/m³, el doble de lo que se paga actualmente (AEAS, 2016). Sin embargo, el coste considerado será el promedio, lo que da como resultado el siguiente coste total en la cuenca:

$$0,17 \text{ €/m}^3 * 1.053 * 106 \text{ m}^3 \text{ anuales} = 179.010.000 \text{ €}$$

Es interesante considerar que la agricultura, además de ser el sector con mayor consumo de agua, lo es también para el caso del agua reutilizada, con un valor del 70% del consumo, lo cual es notable de cara a entender por qué los costes en la agricultura son inferiores a los presentados para el uso doméstico e industrial.

Ocio, O1

Debido a que existen muchas actividades asociadas al ocio de difícil cuantificación en cuanto al empleo del agua (actividades como el surf, piragüismo, etc.) se van a estimar los valores teniendo en cuenta las actividades asociadas al turismo (tanto nacional como internacional), considerándose el gasto hotelero y restaurador, actividades como el golf, saunas, parques temáticos y el gasto municipal en servicios de higiene.

Además, este sector lleva asociada otra dificultad de cálculo a nivel de la modelización de la cuenca teórica, pues siguiendo con la metodología para los otros sectores se aplicarán tanto para los ingresos como para los costes un valor promediado entre el número de cuencas españolas. Sin embargo, la realidad es que, a la hora del estudio del caso práctico, hay que considerar que las actividades turísticas se concentran en un 70% en los archipiélagos y en las costas mediterráneas y atlántica andaluza, coincidiendo precisamente con las zonas de mayor estrés hídrico.

Atendiendo en este apartado únicamente a los valores promediados, el sector del turismo en España implica unos ingresos del 12% del PIB. Teniendo en cuenta que el valor de PIB en España en el 2018 fue de 1.206.878 millones de euros, el valor que le correspondería a la cuenca teórica sería el siguiente:

$$1.206.878.000.000 \text{ €} * 0,12 * 1/15 = 9.655.000.000 \text{ €}$$

Por otro lado, para el cálculo de los costes, del mismo modo que para la ciudad se va a calcular utilizando la tarifa promedio. Como ya se indicó anteriormente este valor alcanza los 1,77 €/m³, mientras que el consumo de agua anual asociado al turismo se estima en aproximadamente 50 millones de metros cúbicos anuales a lo que habría que añadir los 120 millones de metros cúbicos asociados al gasto en campos de golf anualmente, lo que da un total de 170 millones de metros cúbicos anuales.

Pasando este valor a cifras monetarias en la cuenca teórica, el valor del coste de agua asociado al ocio en España sería el siguiente:

$$170.000.000 \text{ m}^3 * 1,77 \text{ €/m}^3 * 1/15 = 20.060.000 \text{ €}$$



Retornos de caudal

En cuanto al retorno de caudal, se estima que en España se tiene un retorno a las redes, a través del tratamiento en las 2.940 plantas EDAR, del 83% del caudal de agua. Dado que el volumen que llega a las depuradoras es de 5.160 hm³, el caudal que se retorna alcanza un valor de 4.300 hm³ anuales, siendo el caudal reutilizado de 520 hm³ anuales, de los cuales el 55% del volumen se utiliza para la agricultura, el 33% para las zonas de ocio y el 12% para la industria. Como se puede observar, no existe volumen de agua reutilizado para uso como agua potable, pues tecnológicamente no está completamente logrado ni cuenta con la aceptación social ni el desarrollo jurídico suficiente.

Este valor equivaldría en la cuenca a un retorno de 287 hm³ anualmente. Este valor tiene una discretización complicada entre los diferentes sectores, pues en muchas regiones las EDAR y las EDARI (para uso industrial) se constituyen en una única planta. Se va a considerar, por lo tanto, que a nivel su reutilización consiste en el aporte del recurso a la cuenca de nuevo, con una devolución promediada para cada uno de los sectores.

Dado que, como se ha expuesto anteriormente, las poblaciones no pueden hacer uso de los recursos reutilizados para consumo humano -aunque sí para utilización de servicios públicos urbanos-, los retornos de las redes del regadío, R1, van a considerarse después del paso del agua por el núcleo urbano, realizando una distribución de los 287 hm³ en función del volumen de agua empleada por cada sector. Se muestra en la siguiente tabla el valor de retorno al cauce correspondiente a cada sector, así como un resumen de los datos establecidos anteriormente para el cálculo de la red teórica.

Tabla 2: Resumen de caudales en la cuenca teórica (Fuente: elaboración propia)

	CIUDAD, C1	INDUSTRIA, I1	REGADÍO, R1	OCIO, O1
Consumo [m³/año]	285.000.000	65.000.000	1.053.000.000	11.333.000
Retorno [m³/año]	57.400.000	14.350.000	215.250.000	-
Ingresos (Y) [€/año]	424.000.000	6.500.000.000	1.053.000.000	9.655.000.000
Factor [€/m ³]	1,49	100,00	1,00	851,94
Costes (Z) [€/año]	503.919.000	153.000.000	179.000.000	20.060.000
Factor [€/m ³]	1,77	2,35	0,17	1,77
Beneficios (X=Y-Z) [€/año]	-79.919.000	6.347.000.000	874.000.000	9.634.940.000
Factor	-0,28	97,65	0,83	850,17

Caudal ecológico, Qeco

Por último, para terminar de definir la cuenca teórica es necesario definir el caudal ecológico teórico que debe mantenerse por cuestiones medioambientales en todo momento en la cuenca, así como el caudal inicial de la cuenca, que, de acuerdo con el modelo propuesto, será la única aportación de agua que exista en la cuenca.

Se va a considerar en el caso teórico que el caudal inicial será aquél que permita mantener el caudal ecológico en la cuenca con cierto margen, siendo este último el 10% del valor inicial. Por



lo tanto, atendiendo al esquema del modelo teórico se va a estimar un caudal inicial $Q_0 = 1.600 \text{ hm}^3$ y un $Q_{\text{eco}} = 160 \text{ hm}^3$. Se representa a continuación el esquema de la red:

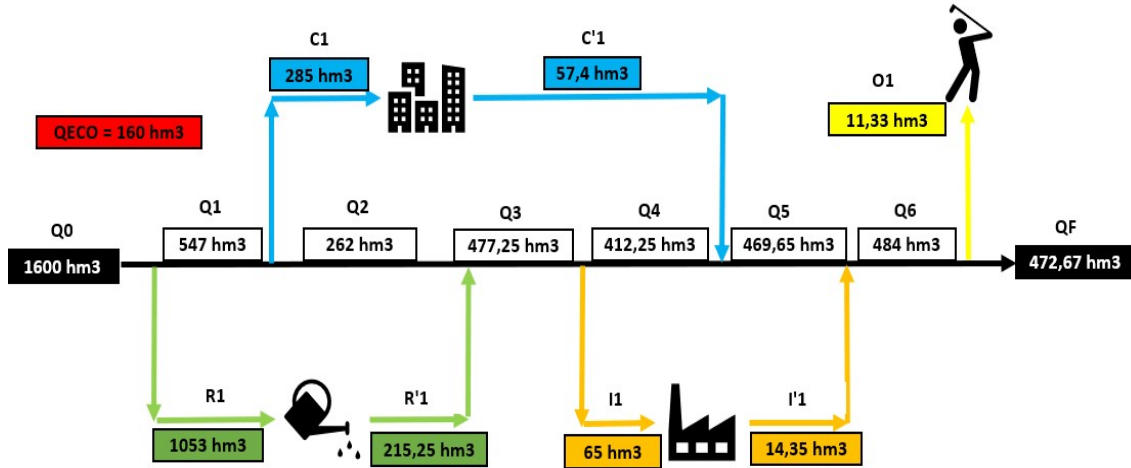


Ilustración 6: Flujos de caudal en la cuenca teórica (Fuente: elaboración propia)

Como se puede observar, no existe en la red ningún caudal inferior al caudal ecológico. A continuación, se definirá el modelo matemático que represente esta red y que permita, variando los valores de caudal definidos para cada actividad lograr la optimización económica de la cuenca sin dejar de lado los aspectos medioambientales.

3.2.3. Representación matemática de la cuenca

En primer lugar, para la representación de la red fluvial se van a redefinir las ecuaciones de continuidad del modelo hidráulico en la cuenca desde su toma de agua en la cabecera hasta la salida representada por el caudal final, considerando que no hay existen pérdidas de caudal en los diferentes tramos, salvo las producidas en los nodos por el propio consumo de los 4 sectores de actividad tratados:

- NOD0: $Q_0 - E = 0$
- NOD1: $Q_1 + R_1 - Q_0 = 0$
- NOD2: $Q_2 + C_1 - Q_1 = 0$
- NOD3: $Q_3 - Q_2 - RA_1 = 0$
- NOD4: $Q_4 + I_1 - Q_3 = 0$
- NOD5: $Q_5 - Q_4 - CA_1 = 0$
- NOD6: $Q_6 - Q_5 - IA_1 = 0$
- NOD7: $Q_F + O_1 - Q_6 = 0$
- ENT: $E = 1600000000$

En cuanto a las restricciones asociadas al caudal ecológico son las siguientes:

- ECO1: $Q_1 - Q_{\text{ECO}} \geq 0$
- ECO2: $Q_2 - Q_{\text{ECO}} \geq 0$
- ECO3: $Q_3 - Q_{\text{ECO}} \geq 0$
- ECO4: $Q_4 - Q_{\text{ECO}} \geq 0$
- ECO5: $Q_5 - Q_{\text{ECO}} \geq 0$
- ECO6: $Q_6 - Q_{\text{ECO}} \geq 0$
- ECO7: $Q_F - Q_{\text{ECO}} \geq 0$
- QECO: $Q_{\text{ECO}} = 160000000$



En cuanto a los consumos correspondientes a cada una de las actividades se pueden expresar su relación entre caudal consumido y retornos del siguiente modo:

- $CA1 - 0.2C1 = 0$
- $RA1 - 0.2R1 = 0$
- $IA1 - 0.2I1 = 0$

Finalmente, la función objetiva de la cuenca sería la siguiente:

$$\text{Beneficio: } -0.28C1 + 97.65I1 + 0.83R1 + 8500I1$$

Es evidente, que, a la vista de esta función, todos los recursos hídricos serían utilizados por la actividad O1, por ser la que presenta un factor más alto de productividad, dejando el resto de las actividades sin caudal. Esta situación que corresponde a un caso ideal de optimización económica de la cuenca no se ajusta a las necesidades reales de consumo en una cuenca. Para subsanar esta situación, en el siguiente apartado se tratará de llevar a cabo la optimización de esta función para buscar, a través de la imposición de condiciones de contorno, el máximo beneficio en diferentes situaciones de gestión de los recursos de la cuenca, contemplando tanto restricciones a las diferentes actividades como cambios en sus factores productivos.

3.2.4. Optimización del modelo

El modelo matemático descrito anteriormente representa una cuenca hidrográfica con una función *Beneficio* asociada, la cual busca el mayor rendimiento económico de la cuenca, a través de los factores productivos de cada actividad, cuando se maximiza.

Para lograr la optimización del modelo se introducen las ecuaciones en el programa de cálculo R®, en el cual se carga la librería *Rglpk*, capaz de lograr la resolución de problemas de programación lineal con capacidad de lectura de ficheros de texto, mostrando los datos por consola, y el paquete *CPLEX_LP* de optimización matemática.

Se muestran a continuación los datos obtenidos por consola de la introducción del modelo sin restricciones o *Escenario 0* y del modelo teórico inicial con los valores propios de cada actividad para obtener el máximo beneficio de la cuenca y el rendimiento económico del modelo base:

- **Escenario 0: modelo teórico inicial sin restricciones y con los valores de referencia**

En primer lugar, se va a observar el comportamiento económico de la cuenca sobre los parámetros de referencia establecidos en el capítulo anterior, como referencia para los sucesivos cálculos. Este resultado vendrá de hacer frente a la siguiente demanda de recursos:

- C1: $C1 = 285000000$
- R1: $R1 = 1053000000$
- I1: $I1 = 65000000$
- O1: $O1 = 11330000$



Javier Arto Cuesta

Se representa este flujo a continuación en un diagrama de Sankey y por consola del programa de optimización:

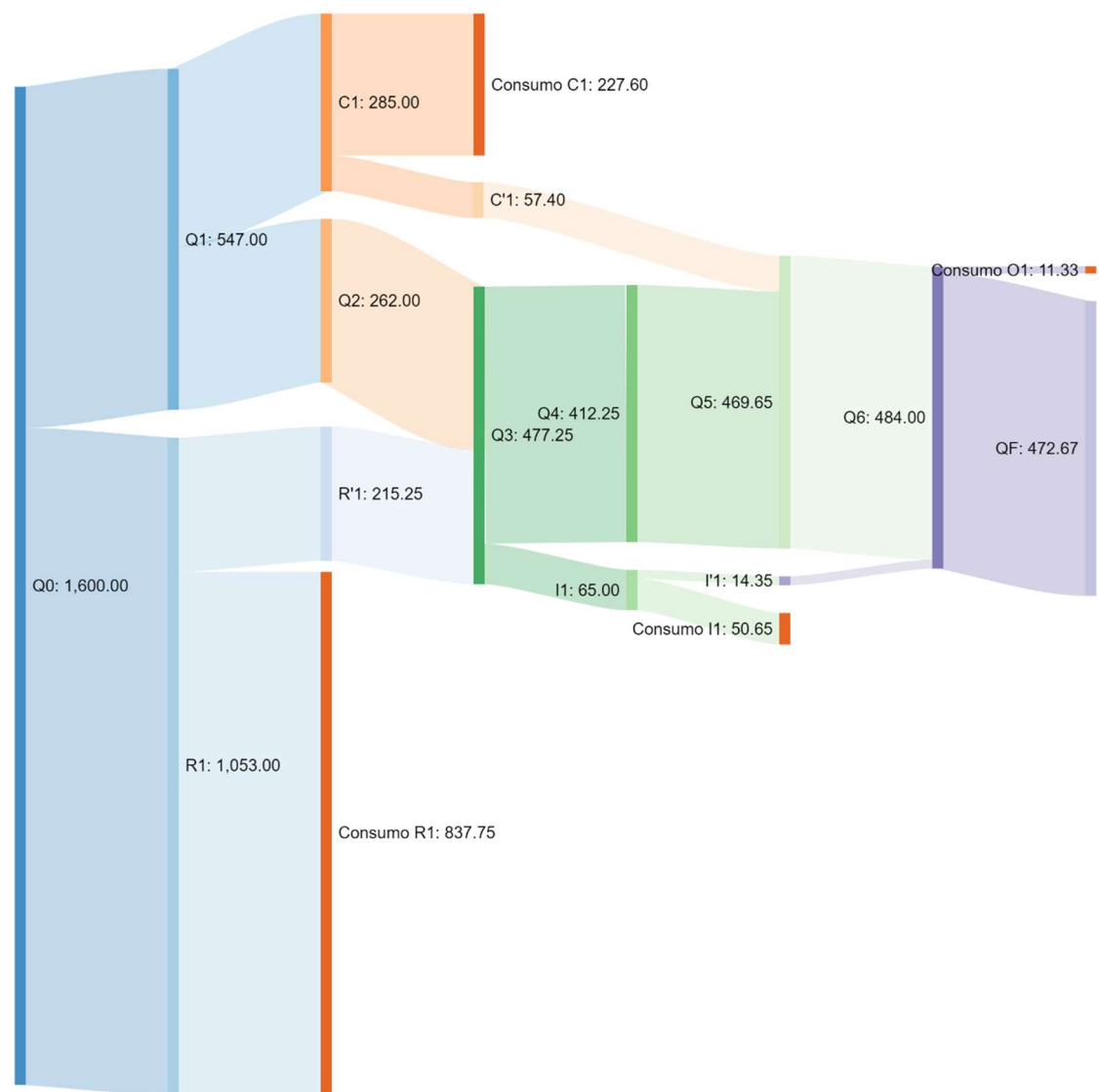


Ilustración 7: Diagrama de Sankey Escenario 0-a (Fuente: elaboración propia)



```
Console ~/03_1 Master ICCP/TFM_Cuenca/R/
> CPLEX("Inicial")
Solution
I1      65000000
R1      1053000000
O1      11330000
C1      285000000
Q0      1600000000
E        1600000000
Q1      547000000
Q2      262000000
Q3      472600000
RA1     210600000
Q4      407600000
Q5      464600000
CA1     57000000
Q6      477600000
IA1     13000000
QF      466270000
QECO    160000000
obj     16771940000
>
```

Ilustración 8: Resultados del modelo teórico inicial o Escenario 0-a (Fuente: elaboración propia)

Como se puede observar, el resultado de la aplicación del modelo teórico inicial daría anualmente un beneficio económico de 16.771.940.000 €. Este caso, supone la referencia económica para el resto de los escenarios, dando a conocer el estado “actual” de la cuenca teórica.

A continuación, se va a llevar a cabo la aplicación del modelo matemático sin restricciones de caudal para las actividades, obteniendo el siguiente resultado:

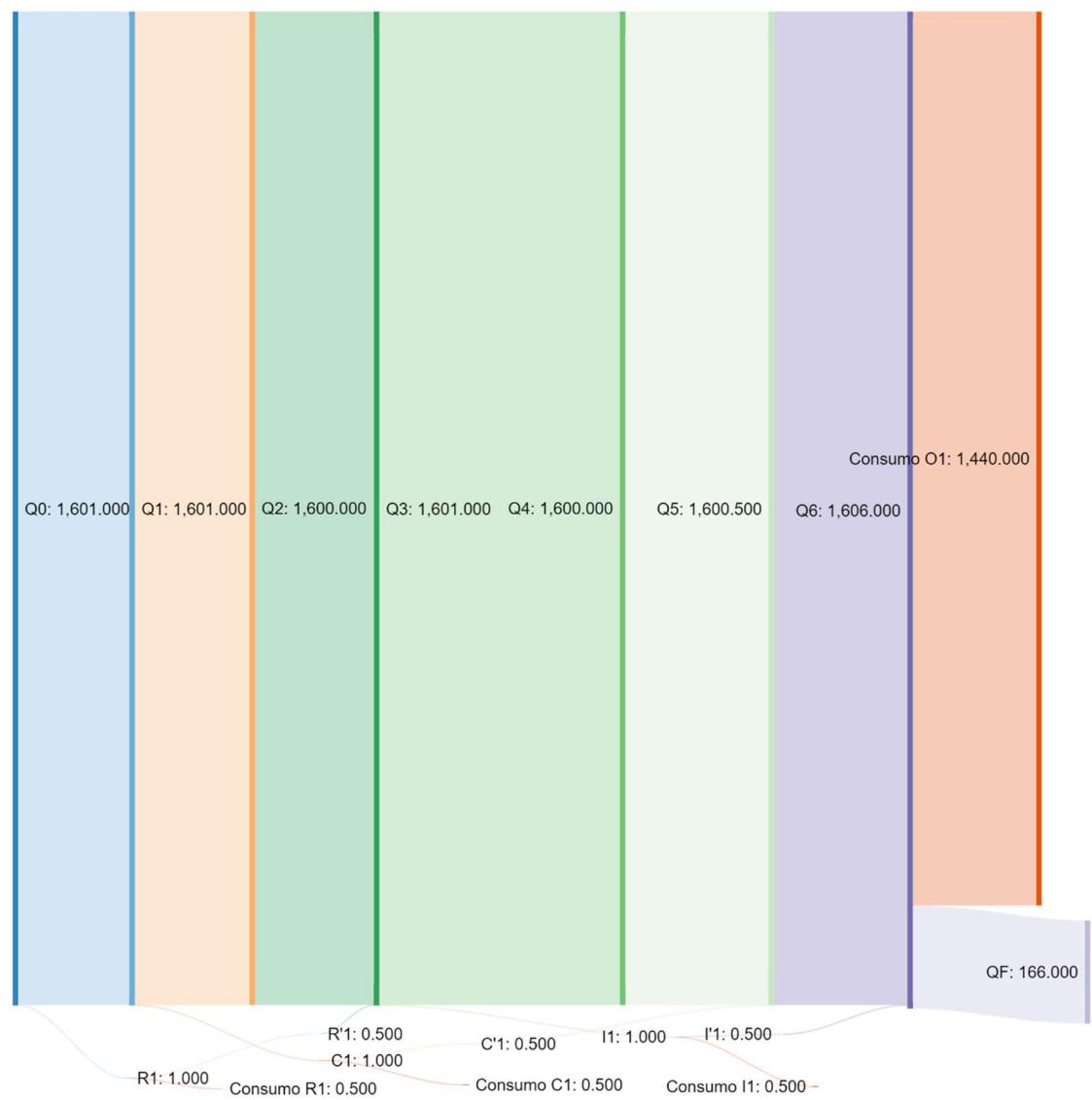


Ilustración 9: Diagrama de Sankey Escenario 0 -b (Fuente: elaboración propia)



```
Console ~\03_1 Master ICCP/TFM_Cuenca/R/
> CPLEX("P1")
Solution
I1 0.000e+00
R1 0.000e+00
O1 1.440e+09
C1 0.000e+00
Q0 1.600e+09
E 1.600e+09
Q1 1.600e+09
Q2 1.600e+09
Q3 1.600e+09
RA1 0.000e+00
Q4 1.600e+09
Q5 1.600e+09
CA1 0.000e+00
Q6 1.600e+09
IA1 0.000e+00
QF 1.600e+08
QECO 1.600e+08
obj 1.224e+12
>
```

Ilustración 10: Resultados modelo teórico inicial Escenario 0-b (Fuente: elaboración propia)

Como se puede observar, los caudales correspondientes a la ciudad (C1), regadío (R1) e industria (I1) tendrían un caudal nulo, manteniendo la totalidad de los recursos por el cauce hasta llegar a la actividad de ocio (O1), donde se consumiría todo el caudal salvo el correspondiente al mantenimiento del caudal ecológico en el último tramo (QF = 160.000.000 m³/año), tal y como se quería demostrar. Este escenario alcanzaría el punto óptimo a nivel económico, con un valor económico de 1.224.000.000.000 €/anuales, más de 70 veces superior a lo que teóricamente se vendría consumiendo según el modelo de referencia.

Sin embargo, este escenario es indudablemente irreal -pues equivaldría a dejar sin agua el resto de los sectores- y, además, ilegal, pues incumpliría el Real Decreto 1/2016, que establece el orden prioritario de uso de los recursos hídricos: (1) dotación a la población; (2) dotación agropecuaria e industrial; (3) uso industrial para producción eléctrica; (4) acuicultura; siendo útil únicamente este modelo a nivel de ensayo.

Es necesario, por lo tanto, establecer una serie de limitaciones que supongan unos caudales mínimos en el resto de las actividades. Estos caudales y el comportamiento de la cuenca se van a observar en una serie de escenarios:

- **Escenario 1: restricciones mínimas de caudal**

Para dar una aproximación a la realidad al caso de la *Escenario 0-b*, se establecen unas limitaciones de caudal mínimo en cada actividad para forzar el curso de agua por cada una de ellas, evitando que la actividad de Ocio, O1, sea la única que disponga de caudal.

Estas restricciones implican que el beneficio a nivel económico se vea reducido. Sin embargo, es una postura realista y que cumple la normativa, pues reparte el caudal entre todas las actividades necesarias para el desarrollo socioeconómico de la cuenca, al contrario que con los escenarios sin restricciones en el que el único factor atendido es el económico. Las tres restricciones incluidas, dado que no es necesario imponerla en el caso de la actividad de ocio, son las siguientes:



Javier Arto Cuesta

- C1: $C1 \geq 285000000$
- R1: $R1 \geq 1053000000$
- I1: $I1 \geq 65000000$

De la aplicación de estas restricciones se obtienen los siguientes resultados:

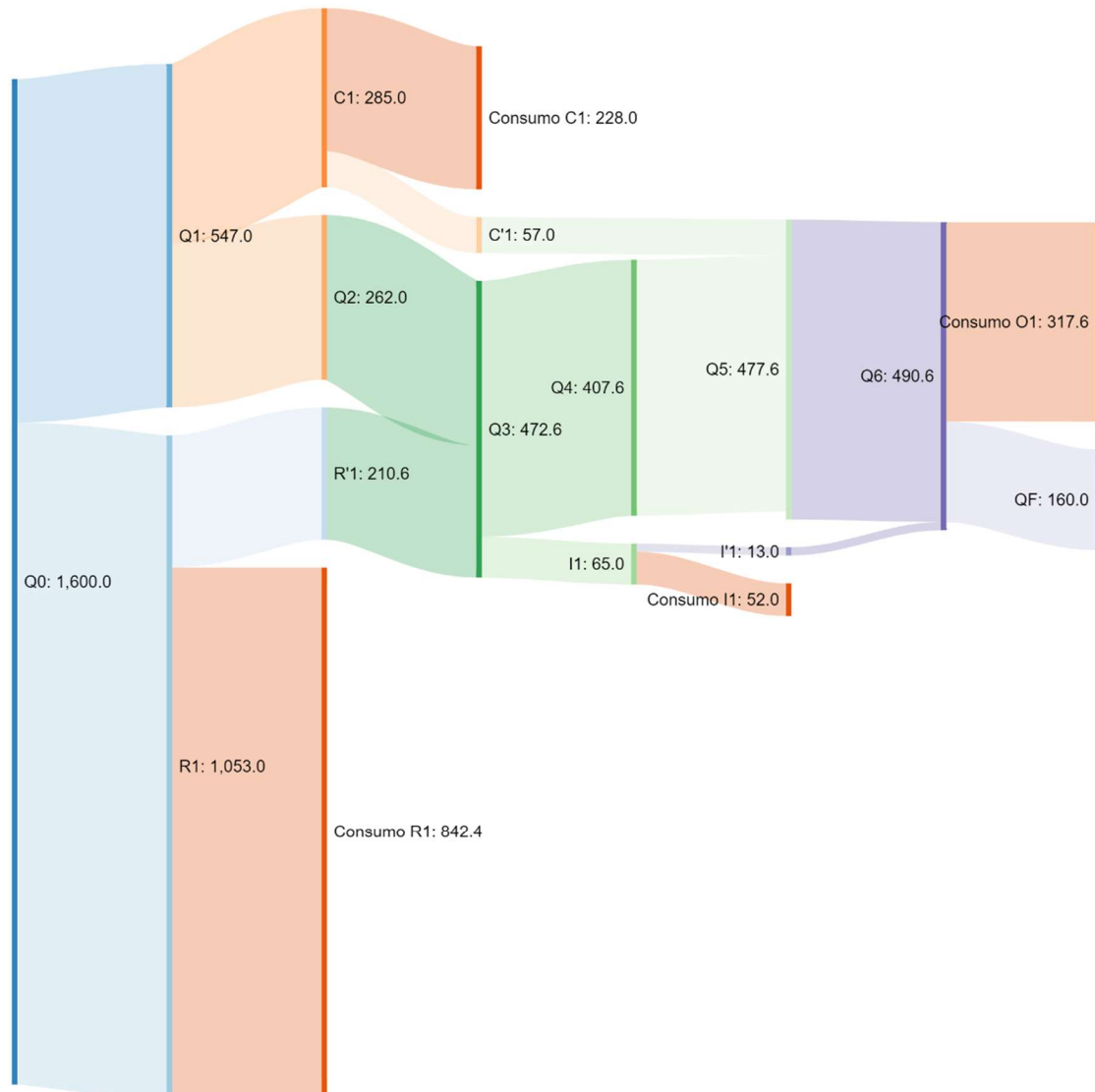


Ilustración 11: Diagrama Sankey Escenario 1 (Fuente: elaboración propia)



```

Console ~\03_1 Master ICCP/TFM_Cuenca/R/
> CPLEX("Hipotesis 1")
Solution
I1      65000000
R1      1053000000
O1      317600000
C1      285000000
Q0      1600000000
E        1600000000
Q1      547000000
Q2      262000000
Q3      472600000
RA1     210600000
Q4      407600000
Q5      464600000
CA1     57000000
Q6      477600000
IA1     13000000
QF       160000000
QECO    160000000
obj     277101440000
>
    
```

Ilustración 12: Resultados Escenario 1 (Fuente: elaboración propia)

Como se puede observar, el beneficio económico de la cuenca se reduce notablemente pasando a ser de 277.101.440.000 €, representando el 22,6 % del beneficio máximo que se puede obtener con los recursos existentes sin la aplicación de limitaciones de consumo en ninguna actividad, debido a la reducción de recursos en la actividad con más productividad (O1) por las condiciones de contorno impuestas en el regadío, la ciudad y la industria.

Sin embargo, a pesar de imponer las condiciones de mínimos del modelo teórico inicial, se aprecian ciertas diferencias respecto a éste, puesto que, en el escenario actual se presenta un uso de recursos en la actividad de ocio mayor, buscando, de este modo, la optimización del modelo, de forma que el caudal de salida es únicamente el correspondiente al caudal ecológico, pues el resto se emplea previamente en O1.

Este escenario obtendría el máximo beneficio en la cuenca con la distribución de recursos que permite el desarrollo mínimo de todas las actividades, según el modelo actual de cuenca, permitiendo la maximización de la actividad de ocio y el mantenimiento del caudal ambiental mínimo en toda la cuenca. No obstante, este modelo podría alentar una problemática sociopolítica asociada, pues la utilización de todos los recursos en O1, a costa de mantener únicamente un caudal ecológico mínimo en la salida, generaría un rechazo de diversos grupos sociales, por priorizar el beneficio económico antes que el desarrollo medioambiental de los cursos fluviales. Además, es importante considerar que las cuencas con mayor estrés hídrico en la Península Ibérica son las situadas en el sureste de ésta, donde se concentra la mayor parte de la actividad turística y las cuencas sufren episodios de sequías más críticos, por lo que distribuir los recursos de forma que únicamente se proponga conservar el caudal mínimo para el mantenimiento ambiental puede suponer un riesgo alto.

- **Escenario 2: limitación de los recursos de las actividades más productivas**

Para considerar la problemática descrita en el párrafo anterior, se van a limitar los recursos máximos empleados en las actividades con mayor producción. En concreto, es importante limitar la actividad de ocio, por el trasfondo social que conlleva, con movimientos de protesta



desde diferentes ámbitos de la sociedad por el uso menos respetuoso con los recursos -en las zonas turísticas el aumento del consumo de agua doméstico durante los picos estacionales llega a multiplicar por 4 el consumo medio-, además de otros factores asociados, como el aumento de precio de los alquileres o el incremento del ruido y los desórdenes asociados al ocio nocturno.

Se va a considerar un valor máximo de uso por la actividad de ocio con un valor de 100 hm^3 , aproximadamente 10 veces superior al del modelo teórico inicial, pero reduciéndose a un tercio del valor empleado en el *Escenario 1*.

Por otro lado, se limitará también a un valor de 100 hm^3 el valor de caudal anual en la actividad de la industria para ver cómo se redistribuyen los recursos en la cuenca.

Se aprecian a continuación los resultados de aplicar únicamente la restricción sobre O1:

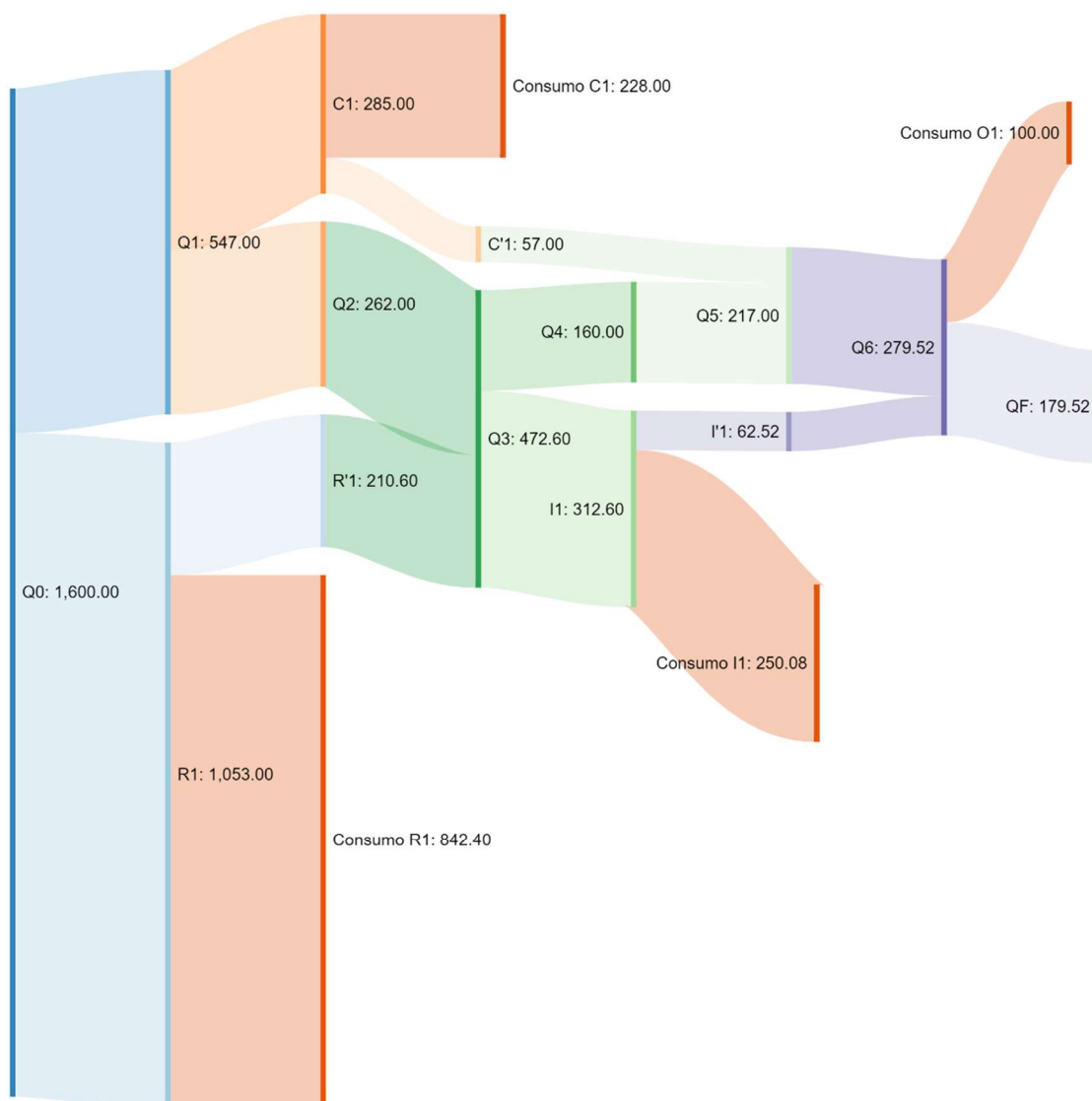


Ilustración 13: Diagrama de Sankey con restricciones sobre O1. Escenario 2-a (Fuente: elaboración propia)



```
Console ~/03_1 Master ICCP/TFM_Cuenca/R/
> CPLEX("Hipotesis 2")
Solution
I1      312600000
R1      1053000000
O1      1000000000
C1      285000000
Q0      1600000000
E        1600000000
Q1      547000000
Q2      262000000
Q3      472600000
RA1     210600000
Q4      160000000
Q5      217000000
CA1     57000000
Q6      279520000
IA1     62520000
QF      179520000
QECO    160000000
obj     11631958000
> |
```

Ilustración 14: Resultados de la restricción sobre O1. Escenario 2-a (Fuente: elaboración propia)

Los resultados obtenidos de aplicar las dos condiciones, además de las restricciones anteriormente impuestas en la *Escenario 1*, se muestran en la siguiente imagen:

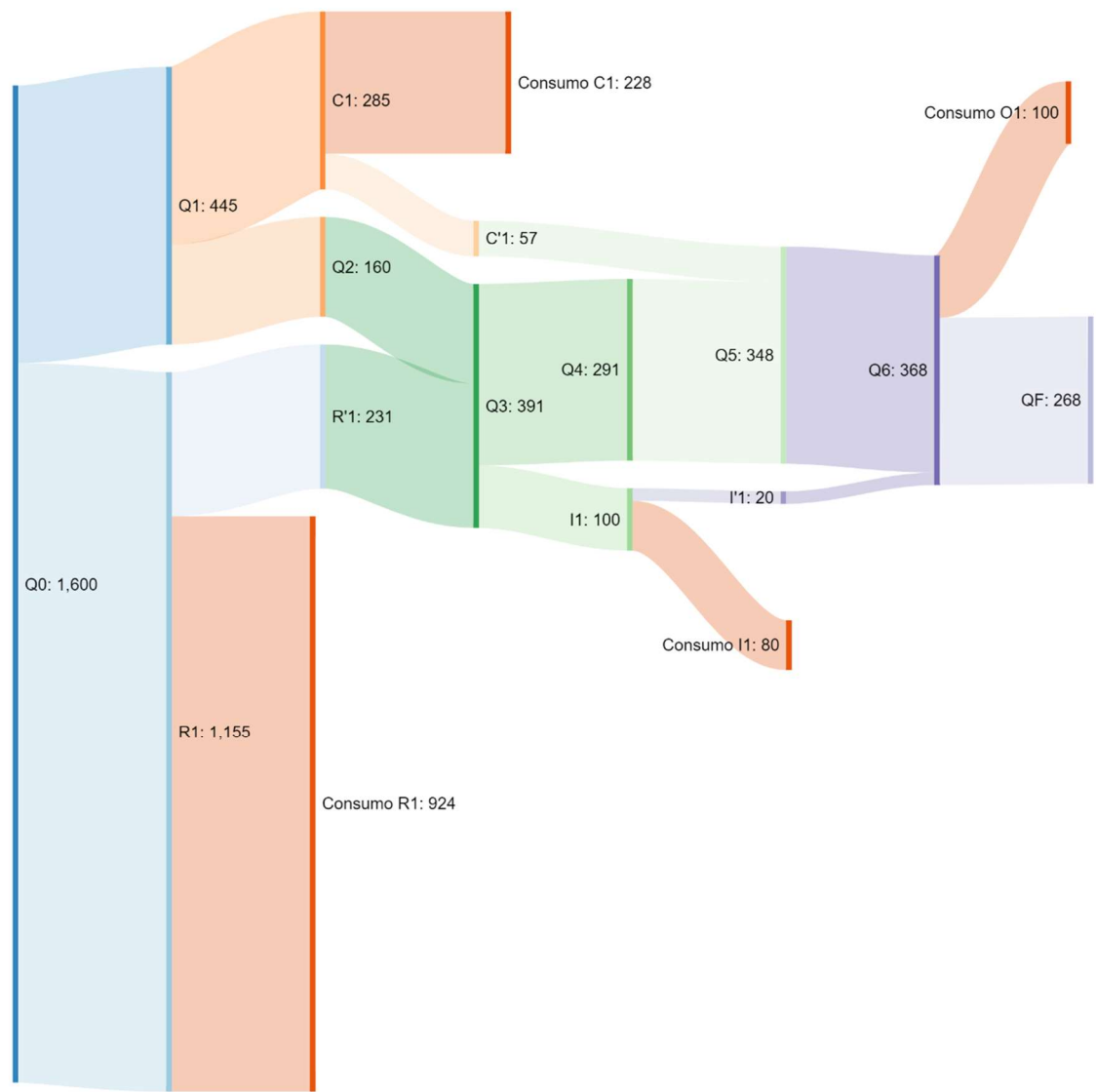


Ilustración 15: Diagrama Sankey Escenario 2-b (Fuente: elaboración propia)



```

Console ~/03_1 Master ICCP/TFM_Cuenca/R/
> CPLEX("Hipotesis 2")
Solution
I1      100000000
R1      1155000000
O1      100000000
C1      285000000
Q0      1600000000
E        1600000000
Q1      445000000
Q2      1600000000
Q3      391000000
RA1     231000000
Q4      291000000
Q5      348000000
CA1      57000000
Q6      368000000
IA1      20000000
QF      268000000
QECO    160000000
obj     95643850000
>
    
```

Ilustración 16: Resultados Escenario 2-b (Fuente: elaboración propia)

Como se observa en la imagen de los resultados mostrados en consola, el beneficio que se obtiene es de 95.643.850.000 €, una reducción notable si se compara con los 1.224.000 millones de euros obtenidos en la *Escenario 0*.

Una de las principales consecuencias de la aplicación de este escenario es que la problemática de caudales mínimos ecológicos surgida en los escenarios anteriores se traslada desde las etapas finales de la cuenca hacia aguas arriba, obteniéndose inmediatamente después de la toma de la ciudad, cuando aún no se han producido retornos a la red y se ha realizado la toma puntual de agua para la actividad de regadío.

La reducción de los caudales en las zonas más altas de la cuenca es debida a las restricciones de caudal en las actividades más productivas, favoreciéndose de esta situación la actividad de regadío, que aumenta los recursos destinados a su desarrollo de 1053 hm³ en el modelo inicial a 1155 hm³ en este escenario. Su productividad económica inferior a la que presentan la industria y el ocio explica la reducción del beneficio económico logrado.

- **Escenario 3: aplicación de tolerancias sobre las actividades productivas**

Con la intención de lograr tener caudales en todos los puntos de la cuenca superiores al caudal ecológico mínimo se van a aplicar una serie de tolerancias sobre la cantidad de recursos que van a disponer las actividades productivas R1, I1 y O1, tomando como punto de partida el modelo teórico inicial y manteniendo su valor en la ciudad, como consecuencia de dar el máximo cumplimiento al Real Decreto 1/2016.

El objetivo de realizar estos cálculos es conocer qué gestión se puede hacer de los recursos explotados sin comprometer el desarrollo ambiental de la cuenca.

- **Tolerancia 5 %**

En este caso, los valores de las actividades estarán comprendidos en los siguientes rangos:

- Ciudad: $C1 = 285.000.000 \text{ m}^3$



Javier Arto Cuesta

- Regadío: $1.047.735.000 \text{ m}^3 \leq R1 \leq 1.105.650.000 \text{ m}^3$
- Industria: $61.750.000 \text{ m}^3 \leq I1 \leq 68.250.000 \text{ m}^3$
- Ocio: $10.763.500 \text{ m}^3 \leq O1 \leq 11.896.500 \text{ m}^3$

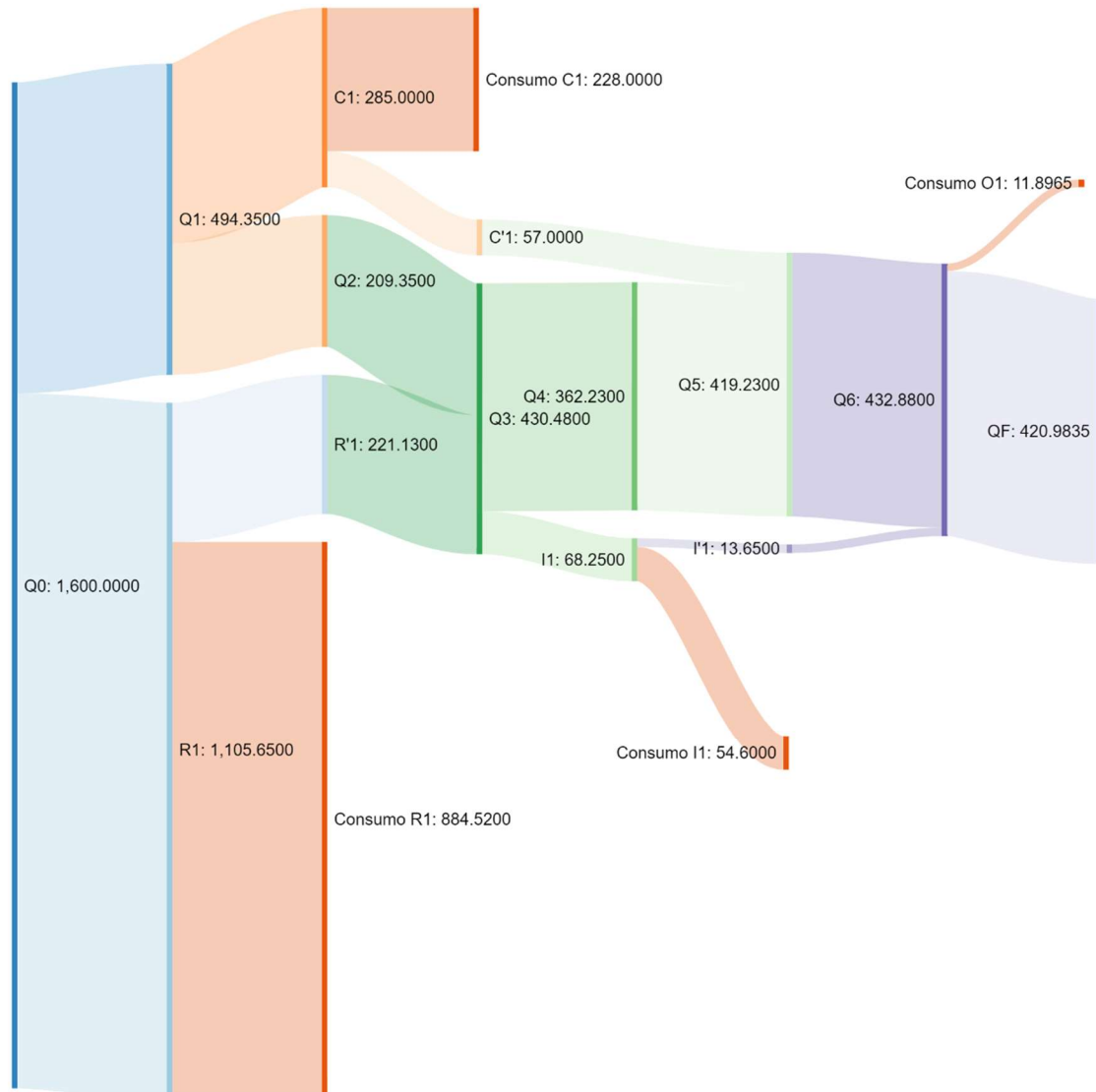


Ilustración 17: Diagrama de Sankey Escenario 3-a (Fuente: elaboración propia)



```

Console ~/03_1 Master ICCP/TFM_Cuenca/R/
> CPLEX("Hipotesis 3_5")
Solution
I1      68250000
R1      1105650000
O1      11896500
C1      285000000
Q0      1600000000
E        1600000000
Q1      494350000
Q2      209350000
Q3      430480000
RA1     221130000
Q4      362230000
Q5      419230000
CA1      57000000
Q6      432880000
IA1     13650000
QF      420983500
QECO    160000000
obj     17614527000
>
    
```

Ilustración 18: Escenario 3-a con tolerancia del 5% (Fuente: elaboración propia)

A la vista de los resultados, el valor del beneficio económico sería de 17.614.527.000 €, no encontrándose en ningún punto de la cuenca en valores de caudal ecológico. Además, tal y como se aprecia, todas las demandas de caudal de las actividades se encuentran en su máximo permitido.

○ Tolerancia 10 %

En este caso, los valores de las actividades estarán comprendidos en los siguientes rangos:

- Ciudad: $C1 = 285.000.000 \text{ m}^3$
- Regadío: $947.700.000 \text{ m}^3 \leq R1 \leq 1.158.300.000 \text{ m}^3$
- Industria: $58.500.000 \text{ m}^3 \leq I1 \leq 71.500.000 \text{ m}^3$
- Ocio: $10.197.000 \text{ m}^3 \leq O1 \leq 12.463.000 \text{ m}^3$

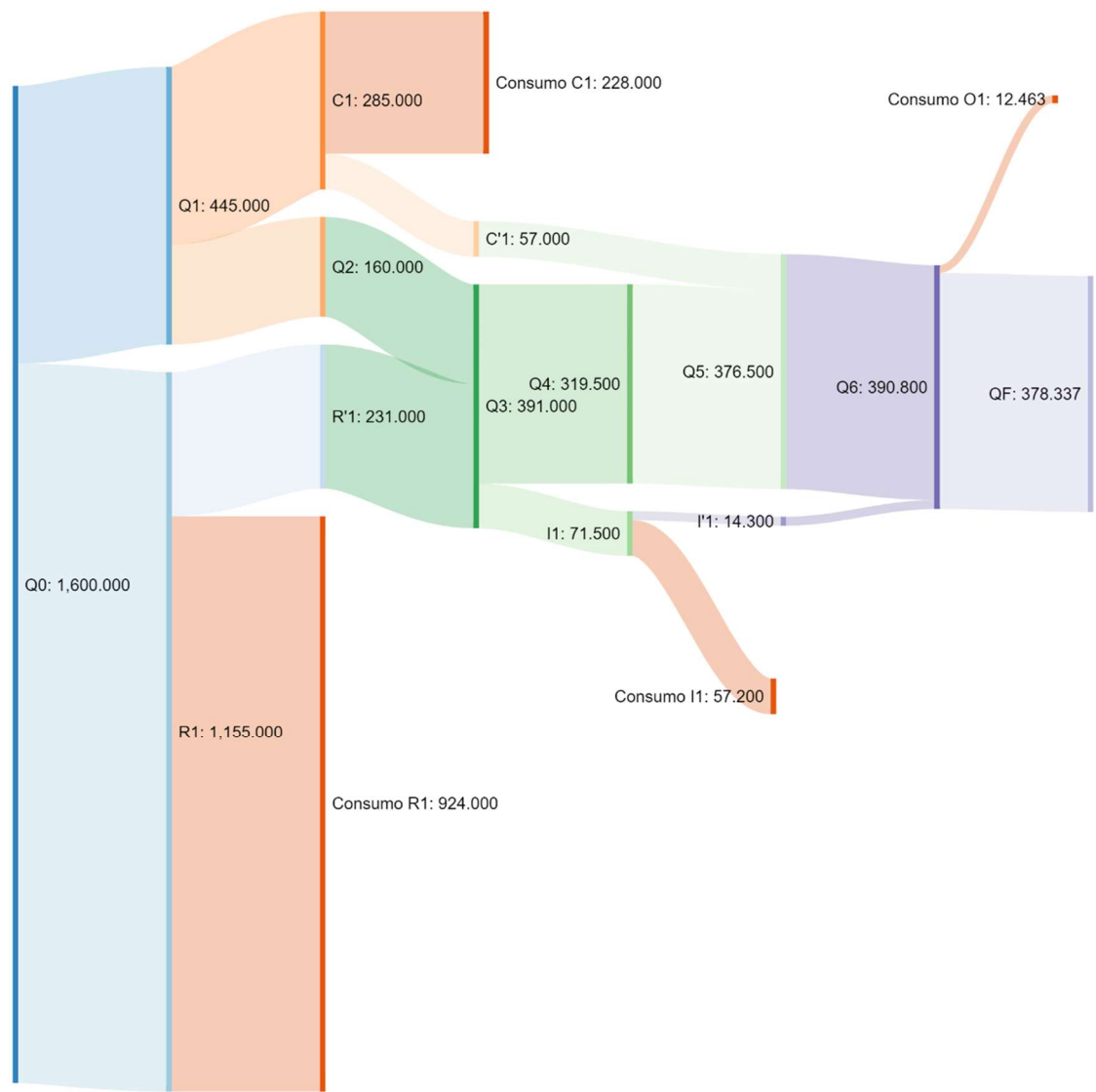


Ilustración 19: Diagrama Sankey Escenario 3-b con tolerancias del 10% (Fuente: elaboración propia)



```

Console ~\03_1 Master ICCP/TFM_Cuenca/R/
> CPLEX("Hipotesis 3_10")
Solution
I1      71500000
R1     1155000000
O1      12463000
C1     2850000000
Q0     1600000000
E       1600000000
Q1      445000000
Q2      160000000
Q3      391000000
RA1     231000000
Q4      319500000
Q5      376500000
CA1      57000000
Q6      390800000
IA1      14300000
QF       378337000
QECO     160000000
obj    18454375000
>
    
```

Ilustración 20: Escenario 3-b con tolerancia del 10% (Fuente: elaboración propia)

En este caso, el beneficio económico, obviamente, aumenta respecto a la situación anterior, por proporcionar mayor cantidad de recursos a las actividades productivas en la cuenca, hasta alcanzar un valor de 18.454.375.000 €. En cambio, ya no podrían aprovecharse todos los recursos en cada actividad, pues el regadío, R1, tendría un consumo menor del ofrecido, debido a que, después de su toma, existiría la limitación del caudal ecológico en la cuenca, al contrario de I1 y O1, donde se aprovecharían todos los recursos ofertados.

Por lo tanto, las tolerancias para no proporcionar unos caudales ecológicos que se encuentren en el límite mínimo, tendrían que estar comprendidas en un valor entre el 5%, donde existe cierta holgura, y el 10% donde habría que limitar el valor del caudal en ciertas zonas al ecológico para lograr el mayor beneficio económico.

- Escenario 4: reducción de la productividad de la actividad O1

Por último, se va a considerar el caso de una reducción del factor productivo de la actividad O1. Se considera que esta reducción es en un factor de 10, adoptando la ecuación a maximizar de la siguiente forma:

$$\text{Beneficio: } -0.28C1 + 97.65I1 + 0.83R1 + 85O1$$

Dado que ahora la actividad industrial es la que presenta mayor rendimiento, se espera que, a la hora de realizar los cálculos, la mayor demanda de agua para maximizar el beneficio tenga que producirse en dicha actividad.

Se muestran a continuación los resultados de este escenario haciendo uso de las restricciones de caudal con la tolerancia del 10% utilizadas en el *Escenario 3*. A pesar, de haber variado la productividad de la actividad de ocio, O1, las demandas requeridas por cada actividad se mantienen en los mismos valores que en el *Escenario 3-b*, debido a que tanto en la actividad industrial como de ocio se encontraban en el límite superior de las tolerancias. Sin embargo, se aprecia una disminución notable en los beneficios.

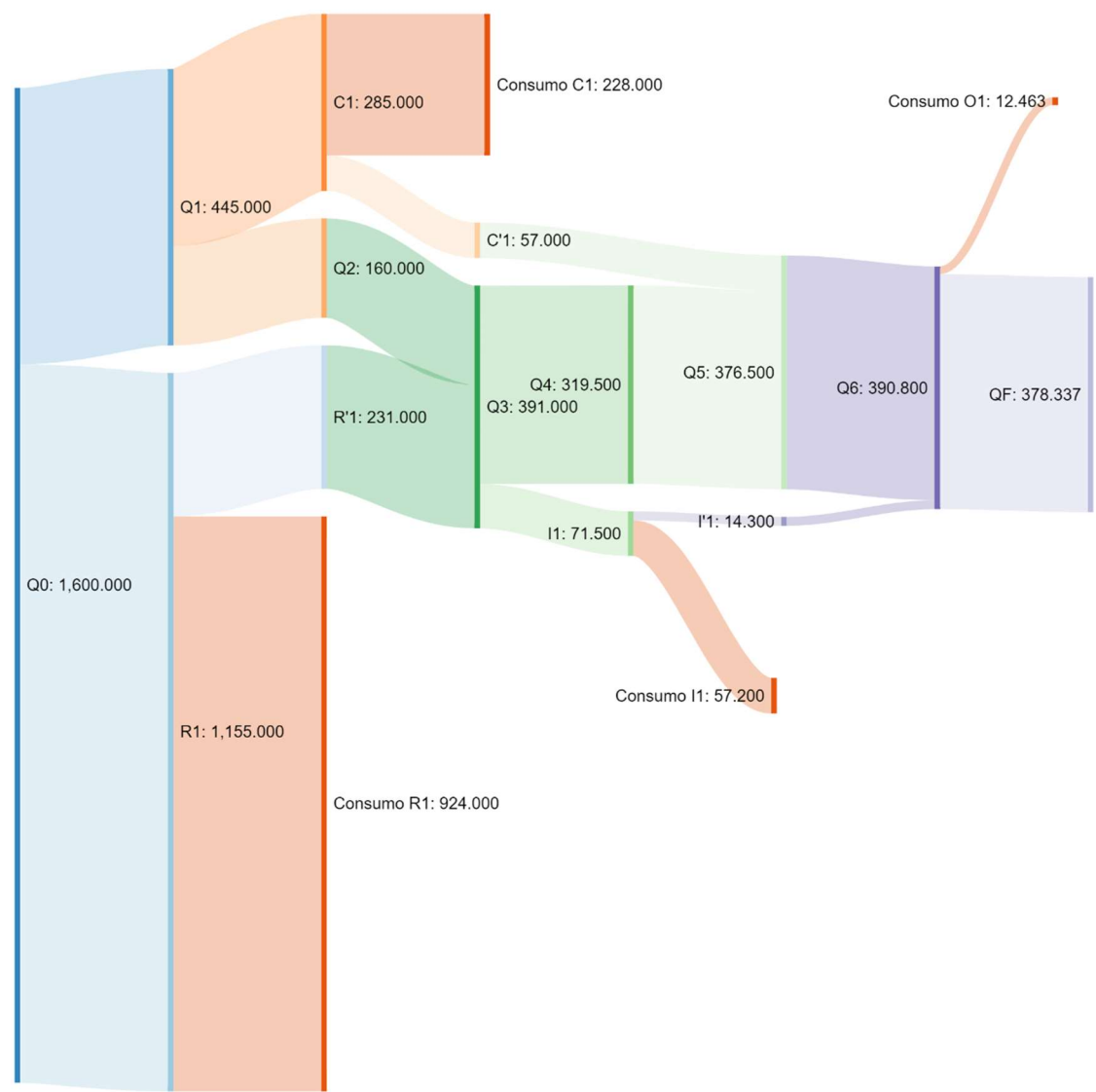


Ilustración 21: Diagrama Sankey Escenario 4 (Fuente: elaboración propia)



```
Console ~/03_1 Master ICCP/TFM_Cuenca/R/
> CPLEX("Hipotesis 4")
Solution
I1      71500000
R1     1155000000
O1     12463000
C1     285000000
Q0     1600000000
E       1600000000
Q1     445000000
Q2     1600000000
Q3     391000000
RA1    231000000
Q4     319500000
Q5     376500000
CA1     57000000
Q6     390800000
IA1     14300000
QF      378337000
QECO   1600000000
obj    8920180000
>
```

Ilustración 22: Resultados Escenario 4 (Fuente: elaboración propia)

Como se puede observar, ahora el beneficio del uso de los recursos hidrológicos en la cuenca sería de 8.920.180.000 € frente a los 18.454.375.000 € del escenario anterior. Esta pérdida viene afectada por la pérdida de productividad global de la cuenca al verse reducida la de su actividad más rentable.

- **Conclusiones**

Las pérdidas o ganancias de productividad aquí estudiadas, dadas como consecuencia de incrementos o decrementos de los precios, implicarían considerar un problema de programación no lineal como si fuese un problema de programación lineal, pues la relación elástica que siguen los precios frente a la demanda tiene una relación como la presentada en la siguiente figura, en la que la se representa en abscisas la cantidad (Q) y en ordenadas el precio (P), dibujando en rojo la relación para la demanda (D) y en azul para la oferta (O):

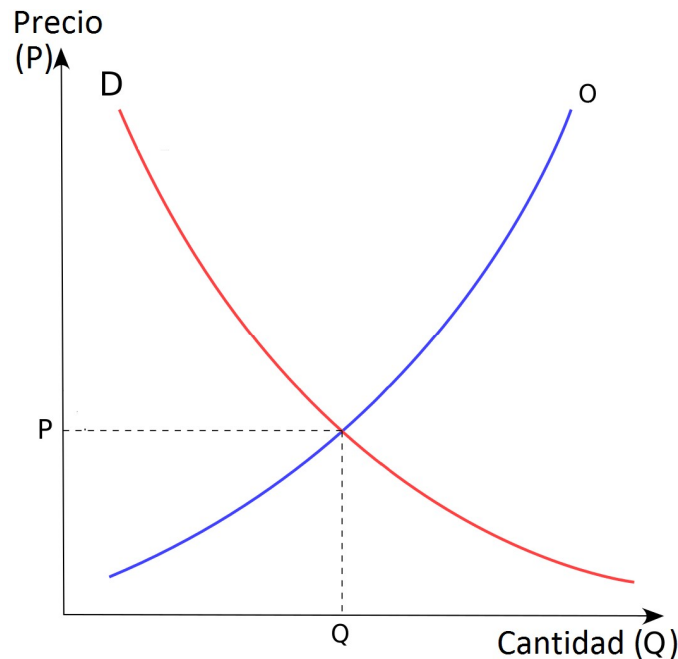


Ilustración 23: Ley de la oferta y la demanda (Fuente: www.economipedia.com)

Para poder abarcar con cierta precisión estos escenarios dentro de un problema de programación lineal, es necesario, en caso de modificar, por ejemplo, el precio al alza por un coeficiente, aplicar otro coeficiente reductor sobre la demanda de agua y, en el caso contrario de reducir el precio del agua por un coeficiente, sería necesario aplicar un coeficiente distinto que incremente la demanda en la actividad en la que se ha producido la reducción del precio. Una validación de los coeficientes aplicados permitirá un ajuste veraz a la realidad.

En los escenarios estudiados las restricciones de consumo de agua por actividad impuestas han supuesto para las actividades más productivas los flujos más restringidos de agua, motivo por el cual los valores del beneficio económico en la cuenca se vean tan alejados del valor del *Escenario 0*, en la que no se limitaba la utilización del agua en ninguna actividad, asignándose todos los recursos en la actividad más productiva con el fin de obtener el máximo beneficio económico.

Se muestra a continuación la gráfica comparativa a nivel económico de los diferentes escenarios considerados en el modelado de la cuenca teórica.

Como se puede observar, a la vista de la gráfica y resumiendo los comentarios realizados anteriormente, las modificaciones sobre la disponibilidad de recursos o sobre la productividad en la actividad O1, por ser la más rentable económicamente para la cuenca, es la que produce mayores variaciones en el beneficio total obtenido respecto a los escenarios 0 de referencia.

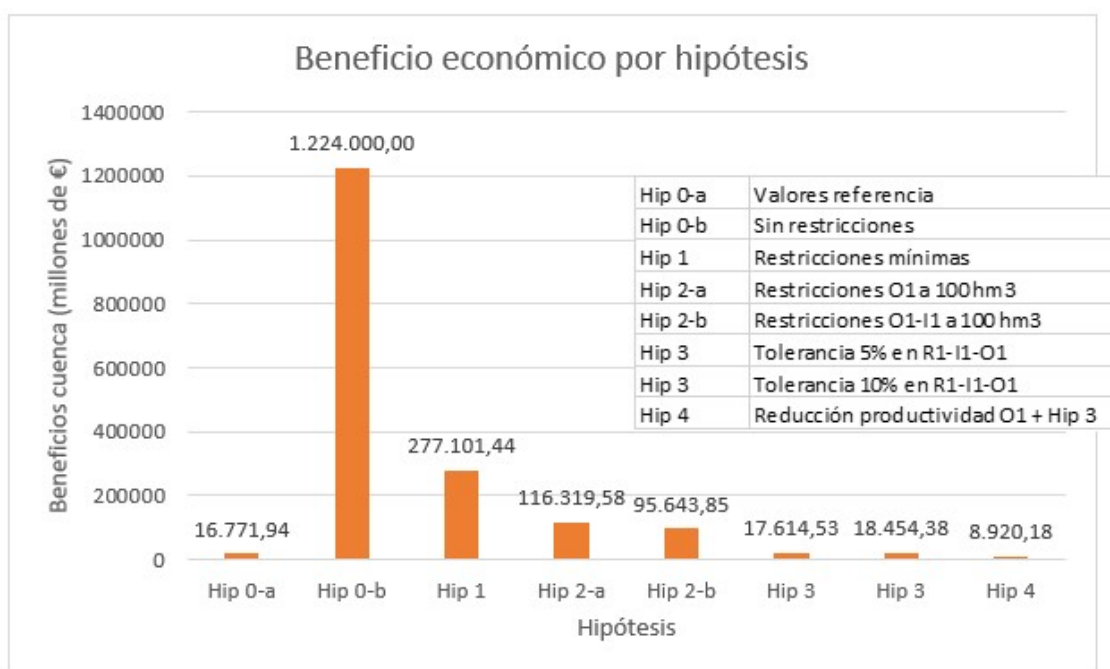


Ilustración 24: Gráfica de beneficios en la cuenca por escenarios (Fuente: elaboración propia)

Además, como se puede observar, todos los escenarios, salvo en la que se asume la reducción de la productividad en O1 (*Escenario 4*), presentan mayor beneficio que en el escenario de referencia (*Escenario 0-a*), debido a una distribución más eficiente de los recursos en cuanto a la búsqueda del máximo beneficio económico se refiere, pero manteniendo siempre el caudal ecológico en las zonas más críticas.

El modelo teórico generado es de utilidad a la hora de conocer dificultades o errores del proceso de diseño corregibles mediante la toma de hipótesis, como la descrita anteriormente con la relación entre precios y demanda o como la consideración de las diferentes actividades como zonas puntuales de toma de agua, para simplificar el diseño y reducir el coste operacional. Sin embargo, el modelo se construye buscando la posterior aplicación de la metodología a un caso real, donde será necesario tomar un número mayor de puntos de toma para caracterizar de forma más veraz la cuenca, equilibrando el coste operacional con la precisión de los resultados.

La cuenca hidrográfica del Segura, perteneciente a la demarcación hidrográfica del mismo nombre y regulada por la Confederación Hidrográfica del Segura (en adelante CHS) es la cuenca que abarca el río Segura y sus afluentes hasta su desembocadura en el Mar Mediterráneo, regando parte de las provincias andaluzas de Jaén, Granada y Almería; un extenso territorio de la provincia manchega de Albacete; zonas alicantinas de la Comunidad Valenciana y la práctica totalidad de la Región de Murcia, con una superficie total de 20.234 km² que recogen 132 municipios y proporciona recursos hídricos a una población superior a dos millones de personas.



Esta cuenca se amolda perfectamente a algunos de los parámetros que se han definido en la problemática de los recursos hídricos en España, pues su propia definición física, ubicada entre la Cordillera Bética y el mar Mediterráneo provoca unas grandes diferencias a nivel topográfico -con cumbres de más de 2.000 metros en la cordillera- generadora a su vez de grandes diferencias poblacionales, desde unas zonas montañosas poco pobladas hasta zonas de gran masificación urbana en su camino hacia la costa, con ciudades como Murcia, Cartagena u Orihuela. En la modelización se tratarán estos puntos de toma urbana de agua puntualmente, del mismo modo que en el caso teórico, concentrando la población de los alrededores en las grandes ciudades, para no añadir un coste operacional al modelo que no sea significativo a la hora del estudio de los resultados.

49



caso demográfico, se señalarán puntualmente aquellos polígonos concentradores de industria que sea más relevantes en la relación hidráulica y económica de la cuenca, concentrando el resto de la industria con cierta importancia en estos focos.

Esta cuenca presenta también cierta problemática a nivel de fenómenos extremos, especialmente de sequías en los períodos estivales por contar con uno de los patrones climáticos más secos del país en su parte litoral, pues se trata de una franja con un clima mediterráneo árido subtropical, con temperaturas medias desde 14º C en la cabecera hasta 18º C en las zonas costeras, alcanzando máximas de 40º C en los meses de julio y agosto. Sin embargo, la presencia de la cordillera permite que se mantenga un clima mediterráneo templado en la cabecera, lo que unido a su caracterización hidrogeológica han permitido la formación de numerosos acuíferos que favorecen el mantenimiento de los caudales de los ríos a pesar de que la precipitación media anual de la demarcación es de 382 mm y la evapotranspiración potencial media (pérdidas físicas y biológicas) es de 700, con una cuenta marcadamente deficitaria.

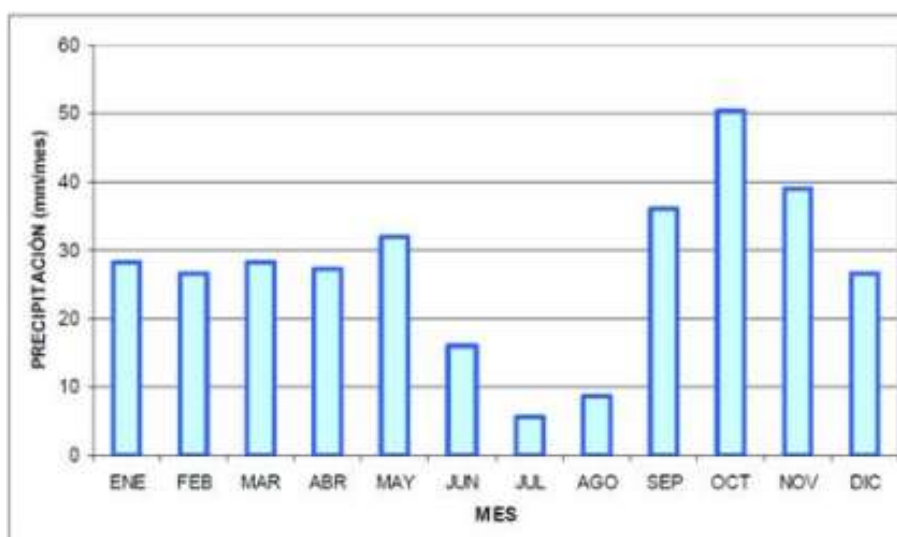


Ilustración 26: Precipitación media total anual en la Demarcación Hidrográfica del Segura (Fuente: PH del Segura 2009-2015)

Esta situación de variabilidad climática, que se verá traducida en disponibilidad de recursos, se contemplará en el modelo mediante la presentación de diferentes escenarios en función de la estacionalidad.

3.3.2. Balance de recursos hídricos

La demarcación del Segura cuenta a nivel interno de cuenca con los siguientes recursos:

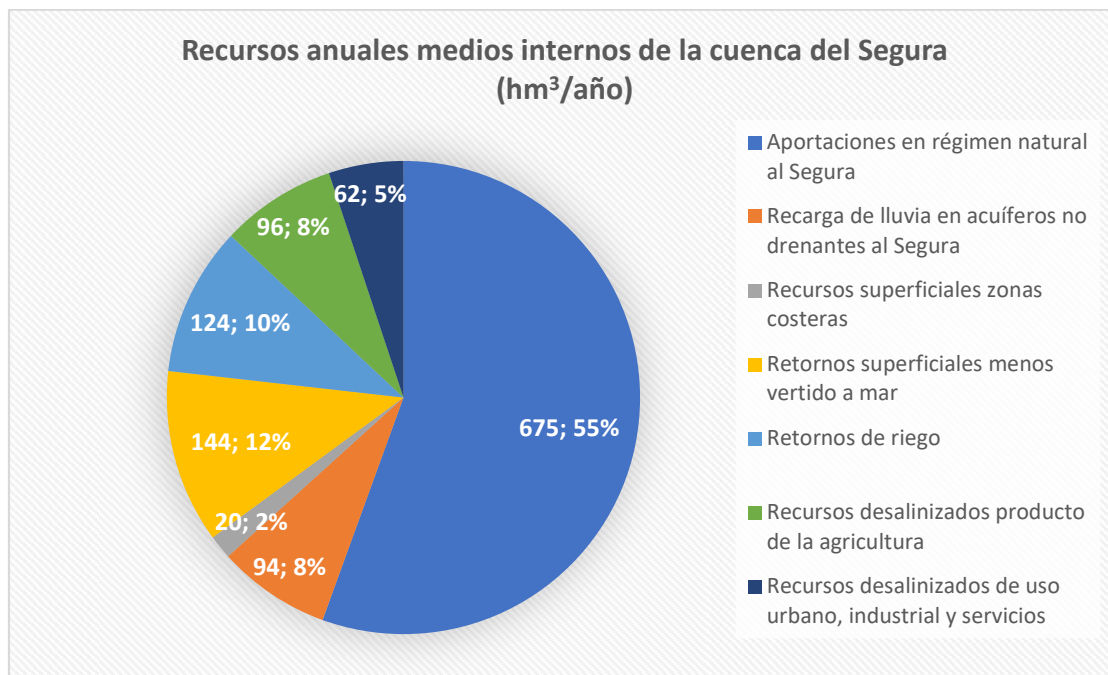


Ilustración 27: Recursos internos de la cuenca del Segura (Fuente: elaboración propia a partir de datos de www.chsegura.es)

Todos estos recursos suman un total de 1.215 hm³ anuales medios. El valor correspondiente a las aportaciones en régimen natural tiene en cuenta la evaporación media producida en los embalses con su nivel medio (75 hm³ anuales). Además, procedente de otras cuencas cuenta con 322 hm³ anuales, repartidos con la siguiente distribución:

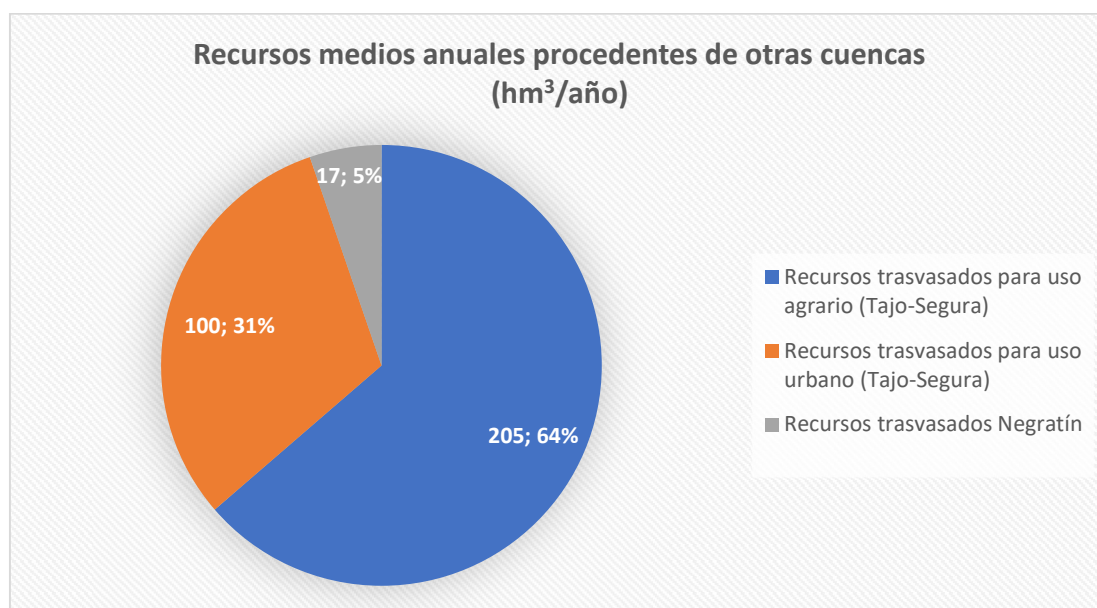


Ilustración 28: Recursos anuales procedentes de otras cuencas hidrográficas (Fuente: elaboración propia a partir de datos de www.chsegura.es)



En cuanto a las demandas en la cuenca se disponen los siguientes datos (CHS, 2012):

Tabla 3: Demanda anual en la Demarcación Hidrográfica del Segura (Fuente: elaboración a partir de datos de www.chsegura.es)

DEMANDA	HM ³	%
URBANA	236	12,9
AGRARIA	1.546	84,3
INDUSTRIAL	9	0,5
OCIO	11	0,6
MANTENIMIENTO MA	32	1,7
TOTAL	1.834	100

No se incluye en esta tabla el uso para generación eléctrica, porque se considera que el retorno de agua de esta actividad es prácticamente total y sin alteración

Además, existe una demanda por actividades situadas fuera de la demarcación, cubierta con recursos de la demarcación. Esta demanda equivale a 107,1 hm³ anuales que podrán incluirse en el modelo como una toma de agua más. Estas demandas adicionales son de carácter urbano agrario y de mantenimiento de humedales, con 46,2, 58,8 y 2,1 hm³ anuales, respectivamente.

A la vista de estos datos proporcionados, en los que la demanda supera en más de 300 hm³ los recursos aportados, es importante considerar que la Región de Murcia, donde se ubica la práctica totalidad de la cuenca es un referente en cuanto a reutilización del agua de sus EDAR, llegando a aprovechar alrededor de un 95% del agua tratada, gracias a la colaboración entre las comunidades de regantes y un organismo creado por el gobierno regional, la Entidad Regional de Saneamiento y Depuración (ESAMUR). Sin embargo, este aprovechamiento no es suficiente para acumular un déficit muy alto de agua, especialmente en la agricultura y ocio, por ser menos prioritario que los usos industriales y urbanos.

En cuanto a los caudales ambientales, la CHS establece una serie de puntos de puntos de control, señalados en verde en la siguiente figura.



Ilustración 29: Puntos de control en la DHS (Fuente: www.chsegura.es)

Los recursos de información oficiales de la cuenca muestran una gran cantidad de caudales ecológicos en función de la zona de la cuenca, correspondientes a dichos puntos de control, ubicados tanto en el cauce principal del Segura como en los cursos de los afluentes. Sin embargo, para la caracterización de la cuenca se tomarán una serie de valores representativos, de forma que no suponga un incremento excesivo del coste computacional, pues la variabilidad es tal que a pesar de tener un valor medio de $0,33 \text{ m}^3/\text{s}$, existen zonas con caudales ecológicos de $2,21 \text{ m}^3/\text{s}$ donde las condiciones son más exigentes y de $0,01$ en los valores mínimos.

Para la generación del modelo, se va a tomar como referencia la distribución hidráulica propuesta por la propia Confederación Hidrográfica del Segura. Ésta distribuye la cuenca en las siguientes zonas hidráulicas:

Se muestran a continuación la leyenda cromática correspondiente y el mapa correspondiente, donde se muestran gráficamente las zonas hidráulicas de distribución de la cuenca. Como se puede observar, muchos de los ríos y arroyos pertenecientes a la cuenca no son afluentes del cauce principal del Segura, como la Rambla del Albujón, el río Nacimiento, el río Seco o la Rambla de los Charcones, transcurriendo además éstos por localidades importantes de la región como Los Alcázares, Torre-Pacheco o Cartagena.

En el siguiente capítulo, se realizará una simplificación de los cauces existentes para minimizar el coste operacional del modelo, manteniendo aquéllos que tengan mayor relevancia, de forma que se equilibre la operatividad del modelo frente a su pérdida de precisión en los resultados.



Tabla 4: Zonas hidráulicas de la cuenca (Fuente: elaboración propia a partir de datos del Plan Hidrológico de la Demarcación del Segura 2015-2021)

Zona Hidráulica	Nombre	Área (km²)
I	Sierra del Segura	2.605
II	Río Mundo	2.419
III	Noroeste de Murcia	1.688
IV	Mula	708
V	Guadalentín	3.340
VI	Ramblas del Noroeste	1.500
VII	Vega Alta	1.389
VIII	Vega Media	412
IX.a	Sur de Alicante. Vega Baja	486
IX.b	Sur de Alicante. Torrevieja	277
IX.c	Sur de Alicante. RLMI	328
X	Sur de Murcia	688
XI	Mar Menor	1.602
XII	Corral Rubio	269
XIII	Yecla	852
XIV	Almería	453

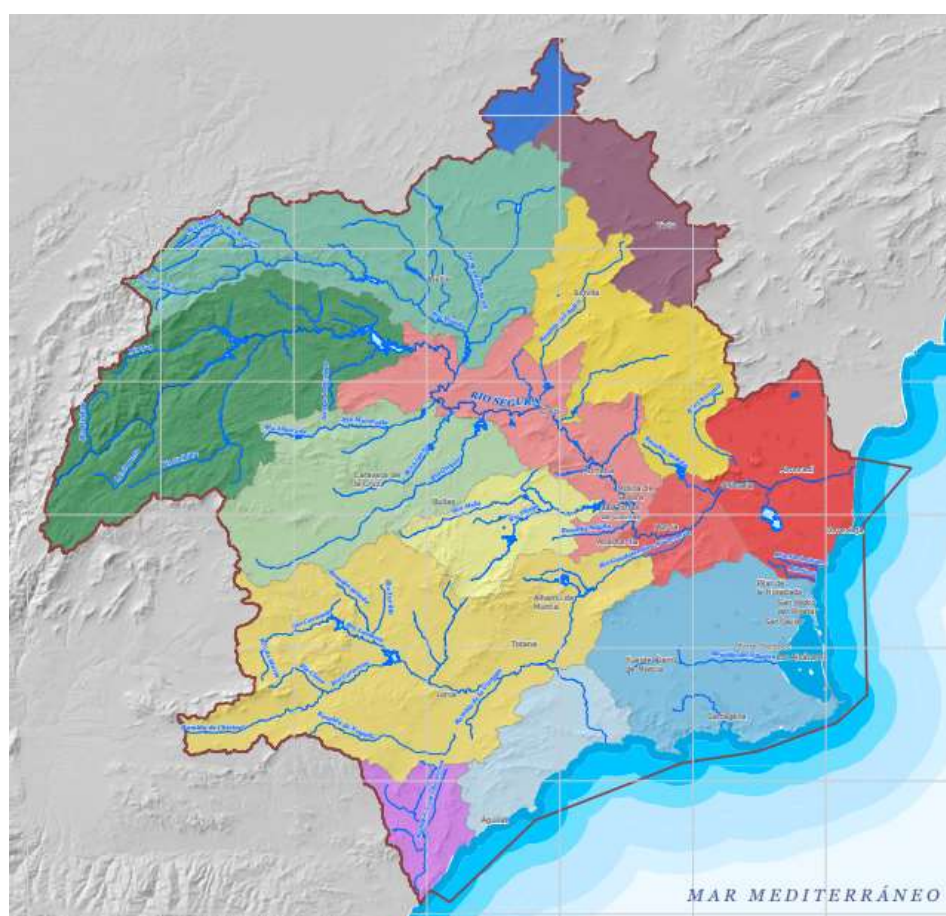


Ilustración 30: Zonas hidráulicas de la Demarcación Hidráulica del Segura (Fuente: www.chasegura.es)



3.3.3. Generación del modelo

3.3.3.1. Obtención de los datos

Siguiendo con la metodología utilizada para el modelo teórico se va a seguir una metodología análoga para el caso real, definiendo las unidades que se van a considerar en el modelo en cuanto a valores de demanda, consumo, retorno y productividad económica de cada una de las unidades.

Núcleos urbanos

Para la definición de los núcleos urbanos, dado que el coste computacional de incluir cada una de los existentes en la cuenca sería excesivo, se van a agrupar en aquellos núcleos más importantes, de forma que exista representación para las zonas hidráulicas o cauces en un núcleo puntual o bien en varios para las zonas más pobladas o que requieran mayor número bien por distribución geográfica o bien por cantidad de población existente en la zona.

De este modo, la ciudad de Murcia, por ejemplo, será representativa también del municipio de Alcantarilla y otros más pequeños, o Torre Pacheco, que comprenderá su propia población y la de otros núcleos urbanos contiguos como San Javier, San Pedro del Pinatar, Pilar de la Horadada o Los Alcázares, todos comprendidos en la misma zona hidráulica y representables en una única unidad por motivos geográficos y por demandas de agua.

Se indican a continuación los núcleos urbanos considerados, así como sus datos más relevantes para la generación del modelo obtenidos del Plan Hidrológico del Segura 2015:

Tabla 5: Unidades urbanas y demanda asociada (Fuente: elaboración propia. Datos: Plan Hidrológico del Segura 2015/21. Anexo I del Anejo 3. Usos y demandas)

NOMENCLATURA	NÚCLEOS PRINCIPALES	POBLACIÓN (HAB.)	DEMANDA (HM ³ /AÑO)	RETORNO (HM ³ /AÑO)
C1 (Murcia)	Murcia y Alcantarilla	650.000	75,9	46,4
C2 (Yecla)	Yecla, Jumilla y comarca del Altiplano	60.000	7,4	4,5
C3 (Molina)	Cieza, Archena, Las Torres de Cotilla y Molina de Segura	180.000	21,3	13,0
C4 (Cartagena)	Cartagena y comarca	290.000	33,8	20,7
C5 (Águilas)	Águilas y Mazarrón	90.000	9,8	6,0
C6 (Lorca)	Lorca, Alhama de Murcia y Totana	180.000	19,8	12,1
C7 (Torrevieja)	Torrevieja y zona litoral	130.000	15,9	9,7
C8 (Orihuela)	Orihuela y Almoradí	160.000	19,6	12,0
C9 (Hellín)	Hellín y comarca	45.000	6,3	3,8
C10 (Caravaca)	Carava de la Cruz y comarca	45.000	7,5	4,6
C11 (Torre-Pacheco)	Torre-Pacheco, Pilar de la Horadada, Los Alcázares, San Javier y San Pedro del Pinatar	160.000	18,7	11,4
TOTAL		1.990.000	235,9	144,2



Los datos de la Demarcación Hidrográfica del Segura indican que el tratamiento de aguas urbanas en estaciones depuradoras alcanza el 98 % del agua que vuelve a la red tras su uso. Este volumen de agua se utiliza posteriormente de dos formas: bien reutilizado directamente o bien retornándolo a la red. Dado que la discretización en los diferentes usos de esta agua tratada es muy diversa, se va a tratar todo el volumen, indicado en la última columna de la tabla anterior, como un retorno a la red, utilizable en el uso que requiera la cuenca para lograr ser más eficiente. El valor de retornos a la red significa entorno al 61,1% del volumen demandado en la cuenca del Segura que se retornan de forma superficial junto con los de la demanda industrial.

La demanda de agua urbana considerada tiene en cuenta no sólo el uso doméstico, sino también el uso comercial de pequeño tamaño y el sector servicios en general, incluido el turismo estacional, lo que, según los datos ofrecidos en el informe *“Análisis académico del Plan Hidrográfica del Segura 2015.20210 a la luz de modernos conceptos de la ciencia de los recursos del agua”* (Confederación Hidrográfica del Segura - Fundación Botín - Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, 2017), presenta un valor añadido bruto 21.982 millones de euros, equivalente a tener una productividad urbana de **93,5 €/m³**, calculado con un valor de la tarifa media ponderada con consideración del abastecimiento y saneamiento de 1,72 €/m³.

Es necesario destacar que no existe déficit imputable a las demandas de uso urbano pues todo el uso de agua que se hace proviene de bombeos renovables, siendo además su suministro garantizado por ley.

Regadío

Análogamente a los núcleos urbanos, se van a distribuir geográficamente en la cuenca diferentes puntos de regadío, definiéndolos a través de su demanda de agua, retornos a la red y productividad.

Dado que la cuenca del Segura es una de las más productivas agrícolamente de la península, la variedad de cultivos que se cultivan es muy amplia, presentando cada uno de ellos réditos económicos muy diferentes. Puesto que no es objeto de este trabajo conocer el tipo de cultivo más productivo a nivel económico, sino generar el modelo a nivel generalizado yendo a una escala de sector, se va a tomar como valor del margen neto del agua en el regadío el mencionado en el *“Anejo 3. Usos y demandas. Plan Hidrológico del Segura 2015/21”*, que presenta un valor medio de **1,16 €/m³**.

Cabe indicar que existen dos tipologías de agricultura en la cuenca: una que podría considerarse industrial, que busca la maximización económica, y otra con un carácter más ocupacional y de ocio con mucho arraigo social en la zona que no busca el beneficio económico. Ambos son considerados en el modelo de forma unitaria, lo que implica que el factor productivo pueda verse reducido respecto del valor que podría alcanzar el factor productivo de la agricultura industrial.

Las unidades de regadío consideradas, recomendadas por el propio Organismo, las cuáles presentan además ciertas similitudes en cuanto a tipo de explotación son las siguientes:



Tabla 6: Unidades agraria y demanda y retorno asociado (Fuente: elaboración propia. Datos: Plan Hidrológico del Segura 2015/21. Anexo I del Anejo 6. Sistemas de explotación y balances.)

NOMENCLATURA	HECTÁREAS (Ha)	DEMANDA (HM ³ /AÑO)	RETORNO (HM ³ /AÑO)
R1 (Altiplano)	32.144	122	9,8
R2 (Cab. Segura)	25.102	108	8,6
R3 (Cartagena)	43.071	259	20,3
R4 (Águilas)	15.169	110	8,8
R5 (Levante Der.)	12.718	75	6,2
R6 (Levante Izq.)	16.602	148	11,9
R7 (Argos)	5.068	30	2,4
R8 (Guadalentín)	43.416	244	19,3
R9 (Moratalla)	2.234	9	1,0
R10 (Mula)	6.369	30	2,5
R11 (Quipar)	4.140	27	2,4
R12 (Vega Alta)	28.914	190	15,1
R13 (Vega Baja)	18.581	126	10,1
R14 (Vega Media)	8.865	68	5,6
TOTAL	262.393	1.546	124,0

Los retornos a la red en los regadíos se pueden diferenciar entre los 57 hm³ anuales que se retornan al sistema superficial y los 67 hm³ que se retornan a los regadíos. De cara a la realización del modelo, dado que no se diferencian los cursos subterráneos de los superficiales a la hora de tener en cuenta la disponibilidad de recursos se toman los 124 hm³ totales conjuntamente, que vienen a representar alrededor del 8 % de la cantidad demandada.

La demanda de los regadíos no se garantiza por ley frente a la demanda de otros usos como el urbano, por lo que, anualmente, de los 1.546 hm³ demandados en la Demarcación, sólo se apliquen de media 1.266 hm³, además de tener un déficit sobre el sistema de recursos no renovables, bombeando agua que no se recupera. Por lo tanto, a la hora de definir el modelo, se aplicará una tolerancia en la demanda del regadío que comprenda una demanda entre el 81 (1266 / 1546) y el 100 % de la demanda total

A pesar de que el uso del agua para la agricultura y la industria se encuentren en el mismo nivel de prioridad de abastecimiento y por encima de la acuicultura y el ocio, es necesario destacar, como se verá también posteriormente en el apartado del Ocio, que las demandas de agua en la industria y el ocio sí son cubiertas en la DHS, al contrario que ocurre, como explica el párrafo anterior, en el caso de la agricultura.

Industria

Las zonas industriales con demanda hidráulica en la Demarcación pueden dividirse principalmente en 7 zonas, aunque la ubicada en el área de riego del río Guadalentín tiene una demanda mínima que no va a ser considerada en el modelo. Por lo tanto, las demandas consideradas, junto con los retornos al sistema son las siguientes:



Tabla 7: Unidades agraria y demanda y retorno asociado (Fuente: elaboración propia. Datos: Plan Hidrológico del Segura 2015/21. Anexo I del Anejo 6. Sistemas de explotación y balances.)

NOMENCLATURA	PRINCIPALES NÚCLEOS	DEMANDA (HM ³ /AÑO)	RETORNO (HM ³ /AÑO)
I1 (Cab. Segura)	Jumilla, Caravaca	0,7	0,4
I2 (Centro)	Cieza, Mula, Las Torres de Cotillas, Yecla	4	2,4
I3 (Murcia)	Murcia, Alcantarilla	0,9	0,5
I4 (Alicante)	Alicante en DHS	2,1	1,3
I5 Litoral)	Cartagena, Águilas, Mazarrón, San Javier, San Pedro del P., Torre-Pacheco y Los Alcázares	0,2	0,1
I6 (Taibilla)	Resto	1,6	1,0
TOTAL		9,5	5,8

Como se mencionó para la demanda urbana, el valor de retornos a la red del uso industrial y del uso urbano se trata conjuntamente, con un valor de retornos a la red de 150 hm³ anuales, lo que supone alrededor del 61% del volumen demandado entre ambas actividades.

En cuanto al margen neto de la industria en la Demarcación hay que considerar que existe una amplia diversidad de tipologías de industria: alimentación, textil, producción de componentes tecnológicos, químicas, metalúrgicas, etc. Dado que el objeto de este trabajo es conocer la distribución óptima de recursos por actividades no interesa reflejar el margen neto de cada una de las diferentes industrias, sino que interesa a nivel medio de todo el sector. Este valor puede evaluarse a partir del informe mencionado anteriormente de “Análisis académico del Plan Hidrográfica del Segura 2015.20210 a la luz de modernos conceptos de la ciencia de los recursos del agua” (Confederación Hidrográfica del Segura - Fundación Botín - Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, 2017), que establece un valor del factor productivo del agua en la industria en la Demarcación del Segura de **1033 €/m³**, siendo con gran diferencia la actividad más rentable.

Ocio

En cuanto a las actividades de ocio relacionadas con el agua, tal y como se indica en el Anejo 3. “Usos y Demandas” de la Demarcación Hidráulica del Segura, la acuicultura no supone un uso significativo en la demarcación, por lo que no es necesario incorporar los datos al modelo.

Sin embargo, sí es significativa la demanda de agua asociada al sector turístico relacionada con el riego de los campos de golf.

Del mismo modo que en el modelo teórico, se considera que la demanda de agua asociada a los campos de golf no repercute tras su uso en un retorno a la red, por lo que se consideran únicamente como puntos de consumo.

Se indican a continuación las unidades de demanda correspondientes campos de golf en servicio con los que cuenta actualmente la demarcación y que se incluirán en el modelo, junto con la nomenclatura que se incorporará al modelo:



Tabla 8: Unidades de ocio y demanda asociada (Fuente: elaboración propia. Datos: Plan Hidrológico del Segura 2015/21. Anejo 3. Usos y demandas)

NOMENCLATURA	ZONA	N.º DE CAMPOS	DEMANDA (HM ³ /AÑO)
O1	Alicante	6	2,36
O2	Almería	1	0,46
O3	Cartagena y Fuente del Álamo	2	2,04
O4	Mazarrón	1	0,32
O5	Murcia y zona del Mar Menor	12	5,00
O6	Zona de la Vega Alta	1	0,36
O7	Zona Centro	1	0,4
O8	Lorca	1	0,4
TOTAL		25	11,34

En cuanto a la productividad económica asociada al agua en las zonas de ocio, desde la Confederación Hidrográfica del Segura se indica que el valor económico asociado a los campos de golf es de 164 millones de euros, lo que representa un margen neto de **13,5 €/m³** por año, deducido de un valor de dotación media de 8.000 m³/ha/año para una superficie media de 50 ha/campo y unos ingresos de 6,08 millones de €/año/ampo, lo que equivale a una productividad de 15,2 €/m³ de los que hay que quitar los costes unitarios (1,70 €/m³) . Este valor medio, se empleará para cada una de las unidades, simplificando en el modelo que todos los campos tienen la misma repercusión económica.

La diferencia de valor entre la productividad indicada para la actividad ocio en el modelo teórico y la aplicada en el caso real radica en la consideración en el modelo teórico de la repercusión del turismo a la economía de forma general, mientras que en el caso real se trata específicamente la demanda hidráulica en los campos de golf, por asociarse de forma más precisa su demanda hidráulica y su repercusión a la economía de la demarcación. Sin embargo, como se comentó en la definición de las unidades de demanda urbana, se consideró en dicho apartado el rendimiento de agua del sector turístico junto con el conjunto de la población, aumentando la productividad de las ciudades desde tener un valor negativo en el modelo teórico a presentar un valor positivo notable en el caso real.

Hay que tener en cuenta que, del mismo modo que para el regadío, la demanda de agua de la actividad de ocio no está garantizada frente a los usos urbano e industrial, por lo que, en caso de ser necesario por escasez de recursos, se limitaría la dotación de agua de esta actividad. Sin embargo, en la cuenca, aunque el uso del agua para regadío sea prioritario frente a la acuicultura, la diferencia de demandas implica que se cumpla anualmente con las demandas de riego de los campos, pero no con el agua demandada por la agricultura.

Análogamente a lo estudiado en el caso teórico, tanto el sector industrial como el sector servicios son económicamente más influyentes en la economía de la cuenca, debido a la productividad asociada a su actividad, llegando a representar más del 90% del VAB, lo que manifiesta la necesidad en términos económicos de destinar más recursos a estas actividades.



Del mismo modo que en el caso teórico, por ajustarse más a la realidad, se genera el modelo en las zonas donde coincidan varias actividades, con la toma de regadío en primer lugar, seguida de los núcleos urbanos y la industria que tendrán su retorno de caudal en el mismo punto por tratarse, en general, en las mismas estaciones depuradoras. Por último, se dispondrán las actividades de ocio, de modo que se favorezca también que la demanda de agua se priorice.

Se muestra a continuación el esquema general de la red a modelada con la nomenclatura utilizada de actividades y caudales, reflejándose posteriormente la imagen ampliada de cada una de las zonas:

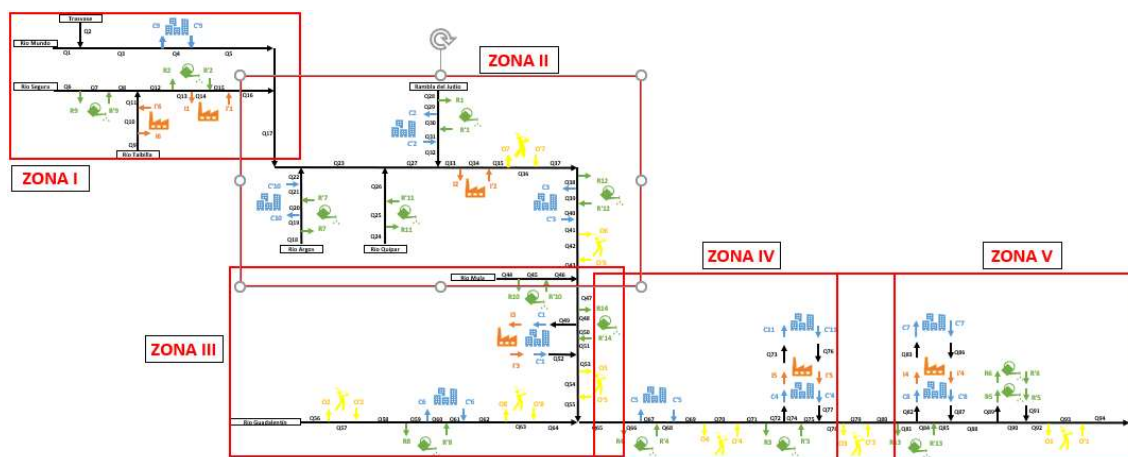


Ilustración 31: Esquema general del modelo de cuenca (Fuente: elaboración propia)

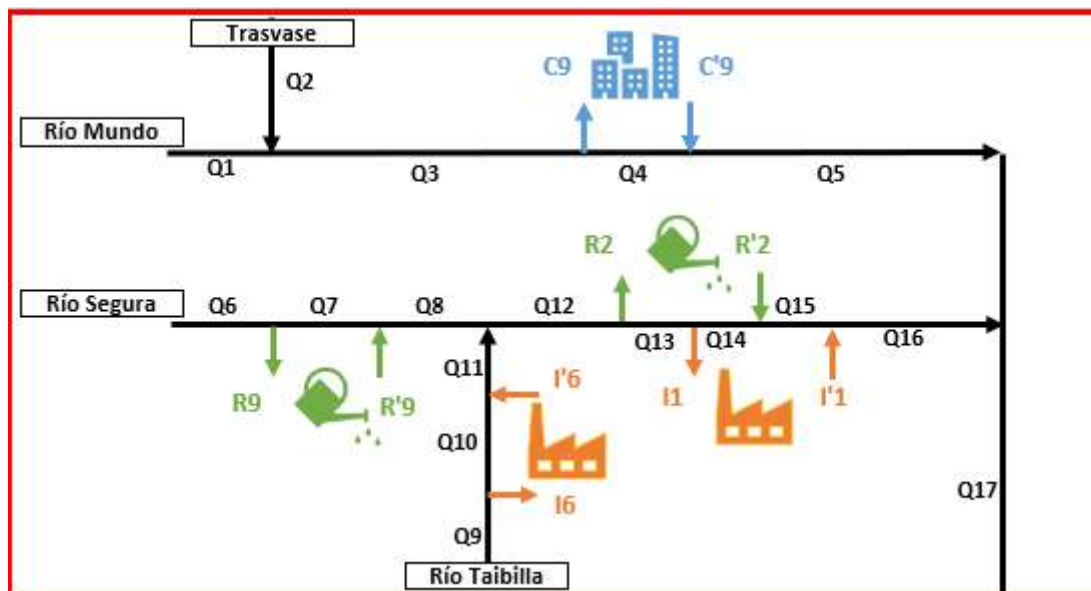


Ilustración 32: Modelo de cuenca Zona I (Fuente: elaboración propia)

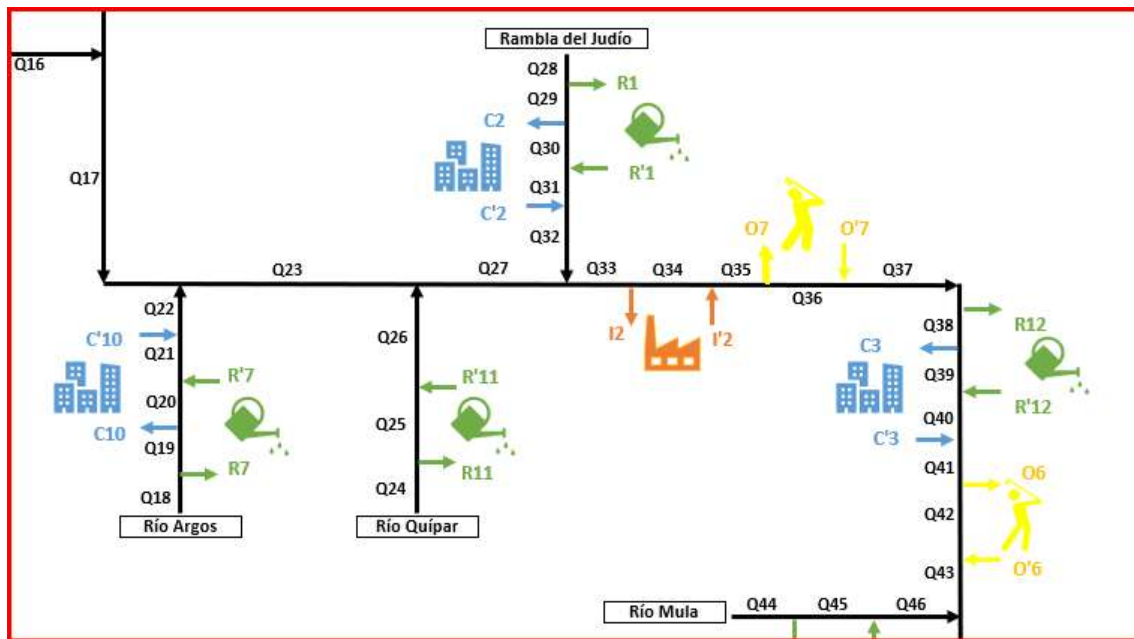


Ilustración 33: Modelo de cuenca Zona II (Fuente: elaboración propia)

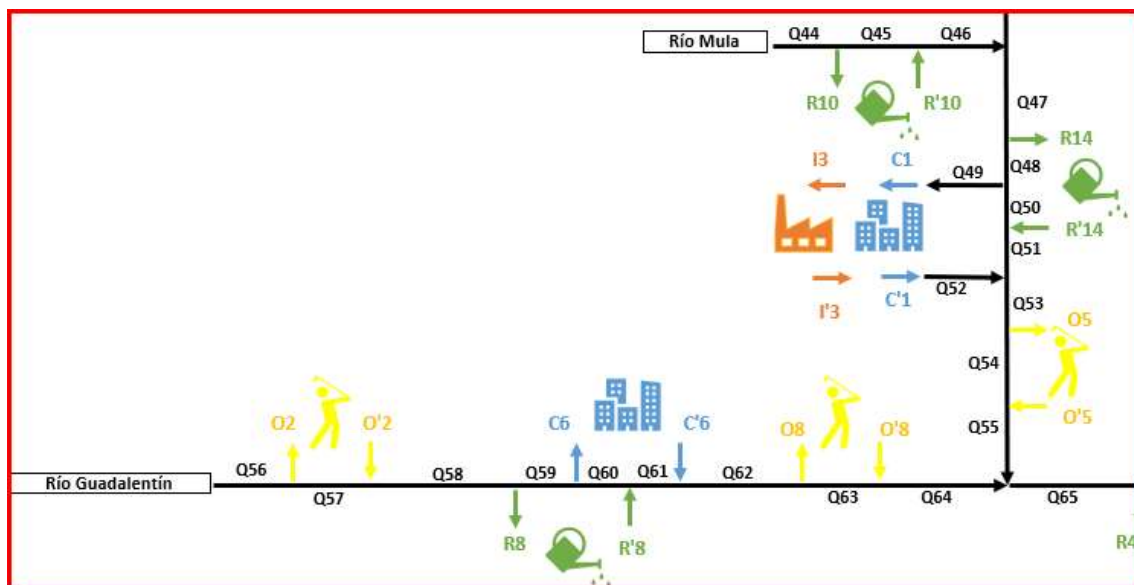


Ilustración 34: Modelo de cuenca Zona III (Fuente: elaboración propia)

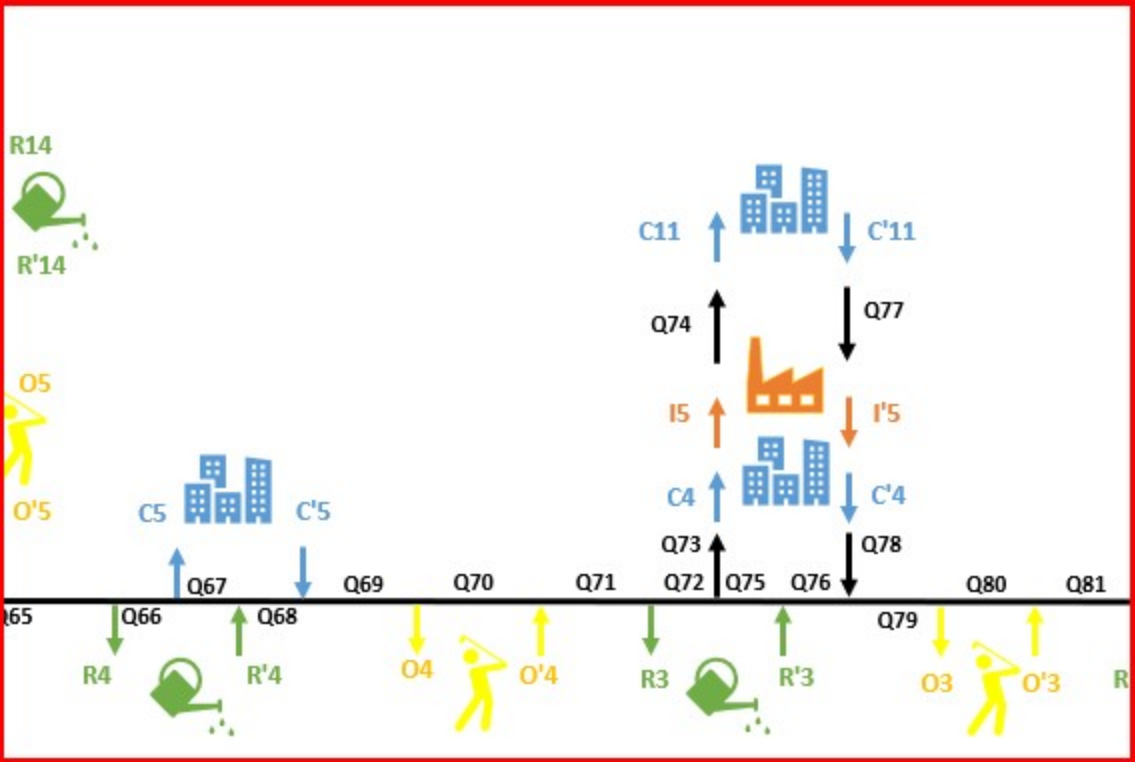


Ilustración 35: Modelo de cuenca Zona IV (Fuente: elaboración propia)

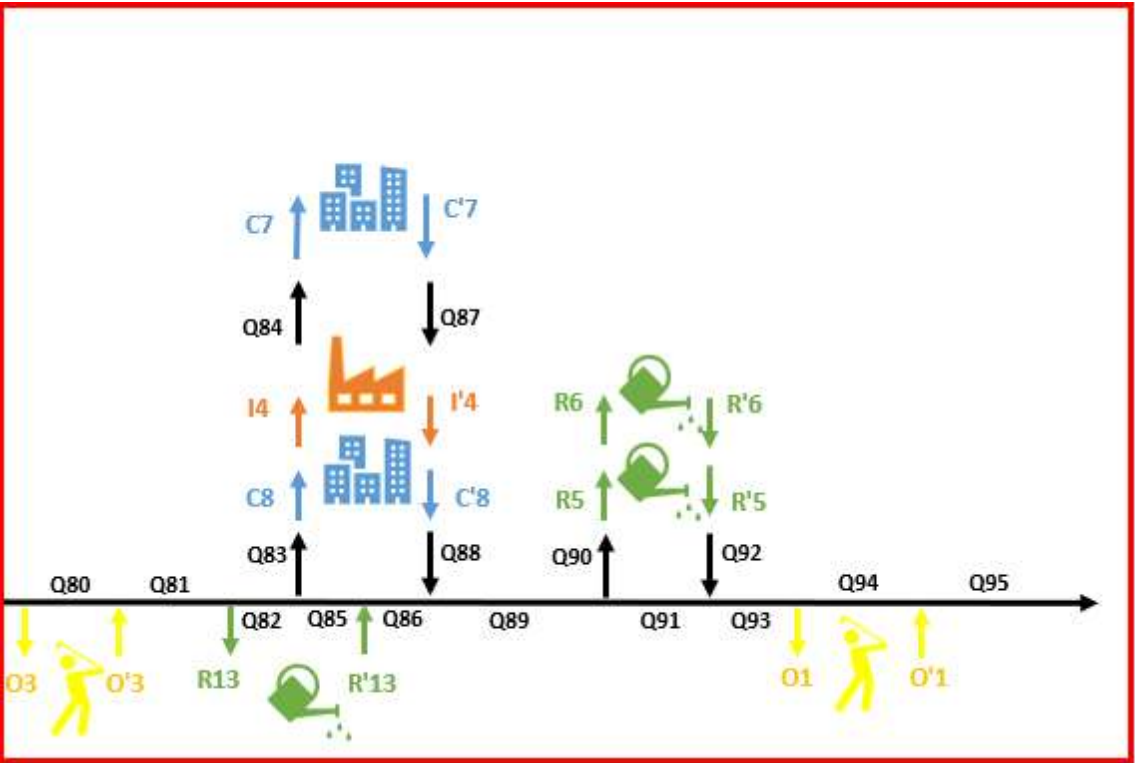


Ilustración 36: Modelo de cuenca Zona V (Fuente: elaboración propia)



Caudales ecológicos

En cuanto a los caudales ecológicos de la cuenca, se establecen sus valores en diferentes zonas, en función de la estructura del modelo. Hay que tener en cuenta que el modelo presentado agrupa el caudal de ciertos afluentes para reducir el coste operacional, lo cual supondría que se podría calcular el caudal ecológico del afluente agrupador como la suma de los afluentes que lo forman. Sin embargo, cada uno de los tramos de los afluentes presenta un caudal diferente, por lo que la suma de los caudales no implica agregar tantos caudales como afluentes, sino sumar una serie de tramos de cada uno de los afluentes. Por otro lado, se debe atender al hecho de que la toma de caudal es única en la cabecera de los cursos, por lo que todo el caudal se va a tener desde el comienzo y se irá reduciendo a medida que vayan sucediéndose las demandas.

De acuerdo con lo anterior, se ha decidido finalmente tomar una serie de caudales ecológicos a través de los datos y esquemas disponibles en las bases de datos de la Confederación Hidrográfica, de forma que, en las cabeceras, a pesar de que el modelo sea más exigente que en la realidad, se compense con el mayor caudal disponible por la toma única en cabecera. Se dispone a continuación los datos de caudal utilizados y los caudales a los que afecta y su equivalencia anual de restricción para el cálculo en el modelo:

Tabla 9: Caudales ecológicos en el modelo de la cuenca del Segura (Fuente: elaboración propia)

NOMBRE	CAUDALES AFECTADOS	CAUDAL (M ³ /S)	RESTRICCIÓN ANUAL (HM ³)
Q _{ECO1}	Q1 – Q5	0,15	4,7
Q _{ECO2}	Q6 – Q8	0,15	4,7
Q _{ECO3}	Q9 – Q11	0,10	3,2
Q _{ECO4}	Q12 – Q16	0,2	6,4
Q _{ECO5}	Q17, Q23, Q27, Q33 – Q43, Q47, Q48, Q50, Q51, Q53 – Q55, Q65 – Q72, Q75, Q76, Q79 – Q82, Q85 – Q86, Q89, Q91, Q93 – Q95	0,3	9,5
Q _{ECO6}	Q56 – Q64	0,02	0,6
Q _{ECO7}	Q18 – Q22, Q24 – Q26, Q28 – Q32, Q44 – Q46	0,05	1,6

No se impone restricción de caudal ecológico en los caudales que aúnan la demanda de varias actividades (Q49, Q52, Q73, Q74, Q77, Q78, Q83, Q84, Q87, Q88, Q90 y Q92)

Toma de caudales

Como se ha mencionado anteriormente, el caudal disponible total en la cuenca anualmente son 1.215 hm³ a lo que hay que añadir los 322 hm³ que se incorporan trasvasados de otras cuencas en el caudal Q2. Para modelar estos recursos se distribuyen en las cabeceras de los ríos en la cuenca que se han incorporado al modelo, agregando no sólo los recursos superficiales que llevan los propios cauces, sino también los recursos subterráneos, así como los provenientes de aguas desalinizadas.



No se incorporan los recursos de los retornos urbanos y de riego agrario (144 y 124 hm^3), que se introducen a la red con la nomenclatura $C'n$ y $R'n$. Por otro lado, los retornos de la actividad de los sectores industrial ($5,8 \text{ hm}^3$) y de ocio ($11,34 \text{ hm}^3$), $I'n$ y $O'n$, respectivamente, se descuentan en el modelo del dato de los recursos desalinizados de uso urbano, industrial y servicios (62 hm^3) señalado en la ilustración de los recursos internos de la cuenca del Segura.

Por lo tanto, el volumen de agua anual que se debe aportar en las cabeceras en el modelo es el siguiente:

- Aportaciones en régimen natural: 675 hm^3
- Recarga de lluvia: 94 hm^3
- Recursos superficiales costeros: 20 hm^3
- Recursos desalinizados de riegos: 96 hm^3
- Recursos desalinizados urbano, industrial y servicios: 45 hm^3
- TOTAL: 930

Por lo tanto, las aguas que se incorporan al modelo se distribuyen como se indica a continuación:

Tabla 10: Caudales incorporados de los cauces (Fuente: elaboración propia)

CAUCE	NOMENCLATURA DEL CAUDAL	CAUDAL (HM^3)
Río Mundo	$Q1$	26,9
Río Segura	$Q6$	229,5
Río Taibilla	$Q9$	65,0
Río Argos	$Q18$	42,6
Río Quípar	$Q24$	43,0
Rambla del Judío	$Q28$	123,6
Río Mula	$Q44$	121,4
Río Guadalentín	$Q56$	297,7
Retornos urbanos	$C'n$	144,2
Retornos agrarios	$R'n$	124,0
Retornos industriales	$I'n$	5,8
Retornos de ocio	$O'n$	11,3
TOTAL APORTACIONES INTERNAS		1215,0
Trasvase	$Q2$	322,0
TOTAL APORTACIONES EXTERNAS		322,0
TOTAL		1537,0

A la vista de estos datos y de acuerdo con el modelo definido, algunas zonas no podrían hacer frente a la demanda de agua. Esto se explica debido a que tanto los recursos del trasvase como los del resto de cauces, se distribuyen por la cuenca mediante canales. Por lo tanto, para dar cumplimiento a las demandas del modelo definido, es necesario redistribuir el volumen aportado por cada cauce del siguiente modo:

3.3.3.2. Representación matemática



Análogamente al caso teórico, es necesario definir las ecuaciones de continuidad del modelo hidráulico, con los datos indicados en el apartado anterior, que caracterizan el flujo de los recursos en la cuenca. El modelo definido, al trabajar con demandas en los puntos de consumo, no considera las pérdidas de agua que pudiesen existir en la red.

Las ecuaciones de continuidad son las siguientes:

Correspondientes a la Zona I:

- NOD1: $Q_1 - MUNDO = 0$
- NOD2: $Q_2 - TRASVASE = 0$
- NOD3: $Q_3 - Q_1 - Q_2 = 0$
- NOD4: $Q_4 + C_9 - Q_3 = 0$
- NOD5: $Q_5 - Q_4 - CA_9 = 0$
- NOD6: $Q_6 - SEGURA = 0$
- NOD7: $Q_7 + R_9 - Q_6 = 0$
- NOD8: $Q_8 - Q_7 - RA_9 = 0$
- NOD9: $Q_9 - TAIBILLA = 0$
- NOD10: $Q_{10} + I_6 - Q_9 = 0$
- NOD11: $Q_{11} - Q_{10} - IA_6 = 0$
- NOD12: $Q_{12} - Q_{11} - Q_8 = 0$
- NOD13: $Q_{13} + R_2 - Q_{12} = 0$
- NOD14: $Q_{14} + I_1 - Q_{13} = 0$
- NOD15: $Q_{15} - Q_{14} - RA_2 = 0$
- NOD16: $Q_{16} - Q_{15} - IA_1 = 0$
- NOD17: $Q_{17} - Q_5 - Q_{16} = 0$

Correspondientes a la Zona II:

- NOD18: $Q_{18} - ARGOS = 0$
- NOD19: $Q_{19} + R_7 - Q_{18} = 0$
- NOD20: $Q_{20} + C_{10} - Q_{19} = 0$
- NOD21: $Q_{21} - Q_{20} - RA_7 = 0$
- NOD22: $Q_{22} - Q_{21} - CA_{10} = 0$
- NOD23: $Q_{23} - Q_{17} - Q_{22} = 0$
- NOD24: $Q_{24} - QUIPAR = 0$
- NOD25: $Q_{25} + R_{11} - Q_{24} = 0$
- NOD26: $Q_{26} - Q_{25} - RA_{11} = 0$
- NOD27: $Q_{27} - Q_{23} - Q_{26} = 0$
- NOD28: $Q_{28} - JUDIO = 0$
- NOD29: $Q_{29} + R_1 - Q_{28} = 0$
- NOD30: $Q_{30} + C_2 - Q_{29} = 0$
- NOD31: $Q_{31} - Q_{30} - RA_1 = 0$
- NOD32: $Q_{32} - Q_{31} - CA_2 = 0$
- NOD33: $Q_{33} - Q_{27} - Q_{32} = 0$
- NOD34: $Q_{34} + I_2 - Q_{33} = 0$
- NOD35: $Q_{35} - Q_{34} - IA_2 = 0$
- NOD36: $Q_{36} + O_7 - Q_{35} = 0$
- NOD37: $Q_{37} - Q_{36} - OA_7 = 0$
- NOD38: $Q_{38} + R_{12} - Q_{37} = 0$
- NOD39: $Q_{39} + C_3 - Q_{38} = 0$
- NOD40: $Q_{40} - Q_{39} - RA_{12} = 0$
- NOD41: $Q_{41} - Q_{40} - CA_3 = 0$
- NOD42: $Q_{42} + O_6 - Q_{41} = 0$
- NOD43: $Q_{43} - Q_{42} - OA_6 = 0$

Correspondientes a la Zona III:

- NOD44: $Q_{44} - MULA = 0$
- NOD45: $Q_{45} + R_{10} - Q_{44} = 0$
- NOD46: $Q_{46} - Q_{45} - RA_{10} = 0$
- NOD47: $Q_{47} - Q_{43} - Q_{46} = 0$
- NOD48: $Q_{48} + R_{14} - Q_{47} = 0$
- NOD49: $Q_{49} + Q_{50} - Q_{48} = 0$
- NOD50: $C_1 + I_3 - Q_{49} = 0$
- NOD51: $Q_{51} - Q_{50} - R_{14} = 0$
- NOD52: $Q_{52} - IA_3 - CA_1 = 0$
- NOD53: $Q_{53} - Q_{51} - Q_{52} = 0$
- NOD54: $Q_{54} + O_5 - Q_{53} = 0$
- NOD55: $Q_{55} - Q_{54} - OA_5 = 0$
- NOD56: $Q_{56} - GUADALENTIN = 0$
- NOD57: $Q_{57} + O_2 - Q_{56} = 0$
- NOD58: $Q_{58} - Q_{57} - OA_2 = 0$
- NOD59: $Q_{59} + R_8 - Q_{58} = 0$
- NOD60: $Q_{60} + C_6 - Q_{59} = 0$
- NOD61: $Q_{61} - Q_{60} - RA_8 = 0$



Javier Arto Cuesta

- NOD62: $Q62 - Q61 - CA6 = 0$
- NOD63: $Q63 + O8 - Q62 = 0$
- NOD64: $Q64 - Q63 - OA8 = 0$
- NOD65: $Q65 - Q55 - Q64 = 0$

Correspondientes a la Zona IV:

- NOD66: $Q66 + R4 - Q65 = 0$
- NOD67: $Q67 + C5 - Q66 = 0$
- NOD68: $Q68 - Q67 - RA4 = 0$
- NOD69: $Q69 - Q68 - CA5 = 0$
- NOD70: $Q70 + O4 - Q69 = 0$
- NOD71: $Q71 - Q70 - OA4 = 0$
- NOD72: $Q72 + R3 - Q71 = 0$
- NOD73: $Q73 + Q75 - Q72 = 0$
- NOD74: $Q74 + C4 + I5 - Q73 = 0$
- NOD75: $C11 - Q74 = 0$
- NOD76: $Q76 - Q75 - RA3 = 0$
- NOD77: $Q77 - CA11 = 0$
- NOD78: $Q78 - CA4 - IA5 - Q77 = 0$
- NOD79: $Q79 - Q76 - Q78 = 0$
- NOD80: $Q80 + O3 - Q79 = 0$
- NOD81: $Q81 - Q80 - OA3 = 0$

Correspondientes a la Zona V:

- NOD82: $Q82 + R13 - Q81 = 0$
- NOD83: $Q83 + Q85 - Q82 = 0$
- NOD84: $Q84 + I4 + C8 - Q83 = 0$
- NOD85: $C7 - Q84 = 0$
- NOD86: $Q86 - Q85 - RA13 = 0$
- NOD87: $Q87 - CA7 = 0$
- NOD88: $Q88 - Q87 - IA4 - CA8 = 0$
- NOD89: $Q89 - Q88 - Q86 = 0$
- NOD90: $Q90 + Q91 - Q89 = 0$
- NOD91: $R5 + R6 - Q90 = 0$
- NOD92: $Q92 - RA6 - RA5 = 0$
- NOD93: $Q93 - Q91 - Q92 = 0$
- NOD94: $Q94 + O1 - Q93 = 0$
- NOD95: $Q95 - Q94 - OA1 = 0$
- NOD96: $SALIDA - Q95 = 0$

En cuanto a las entradas de agua a la red, serían las siguientes:

- MUNDO: MUNDO = 26.9
- TRASVASE: TRASVASE = 322
- SEGURA: SEGURA = 209.5
- TAIBILLA: TAIBILLA = 65
- ARGOS: ARGOS = 42.6
- QUIPAR: QUIPAR = 43
- JUDIO: JUDIO = 123.6
- MULA: MULA = 121.4
- GUADALENTIN: GUADALENTIN = 297.7

Los consumos de red en las diferentes actividades son los siguientes:

- C1: $C1 = 75.9$
- C2: $C2 = 7.4$
- C3: $C3 = 21.3$
- C4: $C4 = 33.8$
- C5: $C5 = 9.8$
- C6: $C6 = 19.8$
- C7: $C7 = 15.9$
- C8: $C8 = 19.6$



Javier Arto Cuesta

- C9: $C9 = 6.3$
- C10: $C10 = 7.5$
- C11: $C11 = 18.7$

Dado que en este primer escenario se van a reflejar los consumos reales en la cuenca, se va a imponer los datos de demanda en las diferentes actividades, para tener una primera estimación del beneficio que resulta de la aplicación del modelo en comparación con los datos existentes en las fuentes oficiales de la Demarcación.

- R1min: $R1 \geq 122 * 0.81$
- R2min: $R2 \geq 108 * 0.81$
- R3min: $R3 \geq 259 * 0.81$
- R4min: $R4 \geq 110 * 0.81$
- R5min: $R5 \geq 75 * 0.81$
- R6min: $R6 \geq 148 * 0.81$
- R7min: $R7 \geq 30 * 0.81$
- R8min: $R8 \geq 244 * 0.81$
- R9min: $R9 \geq 9 * 0.81$
- R10min: $R10 \geq 30 * 0.81$
- R11min: $R11 \geq 27 * 0.81$
- R12min: $R12 \geq 190 * 0.81$
- R13min: $R13 \geq 126 * 0.81$
- R14min: $R14 \geq 68 * 0.81$
- R1max: $R1 \leq 122$
- R2max: $R2 \leq 108$
- R3max: $R3 \leq 259$
- R4max: $R4 \leq 110$
- R5max: $R5 \leq 75$
- R6max: $R6 \leq 148$
- R7max: $R7 \leq 30$
- R8max: $R8 \leq 244$
- R9max: $R9 \leq 9$
- R10max: $R10 \leq 30$
- R11max: $R11 \leq 27$
- R12max: $R12 \leq 190$
- R13max: $R13 \leq 126$
- R14max: $R14 \leq 68$

Como se puede observar, se aplica sobre los regadíos el valor de las tolerancias de consumo mencionadas en su correspondiente apartado, estimando que debido a la falta de recursos para esta actividad en la cuenca del Segura se podía tener una pérdida de consumo del 19% respecto a la demanda de riego.

En cuanto a las representaciones en R de las demandas de la industria y ocio son las siguientes:

- I1: $I1 = 0.7$
- I2: $I2 = 4$
- I3: $I3 = 0.9$
- I4: $I4 = 2.1$
- I5: $I5 = 0.2$
- I6: $I6 = 1.6$
- O1: $O1 = 2.36$
- O2: $O2 = 0.46$
- O3: $O3 = 2.04$
- O4: $O4 = 0.32$
- O5: $O5 = 5$
- O6: $O6 = 0.36$
- O7: $O7 = 0.4$
- O8: $O8 = 0.4$

Por otra parte, es necesario representar matemáticamente la relación entre demanda, consumo y retorno en cada una de las actividades. Se indican a continuación dichas relaciones en función de los datos anteriormente descritos:

- CA1: $CA1 - 0.611C1 = 0$
- CA2: $CA2 - 0.611C2 = 0$
- CA3: $CA3 - 0.611C3 = 0$
- CA4: $CA4 - 0.611C4 = 0$



Javier Arto Cuesta

- CA5: $CA5 - 0.611C5 = 0$
- CA6: $CA6 - 0.611C6 = 0$
- CA7: $CA7 - 0.611C7 = 0$
- CA8: $CA8 - 0.611C8 = 0$
- CA9: $CA9 - 0.611C9 = 0$
- CA10: $CA10 - 0.611C10 = 0$
- CA11: $CA11 - 0.611C11 = 0$
- RA1: $RA1 - 0.08R1 = 0$
- RA2: $RA2 - 0.08R2 = 0$
- RA3: $RA3 - 0.08R3 = 0$
- RA4: $RA4 - 0.08R4 = 0$
- RA5: $RA5 - 0.08R5 = 0$
- RA6: $RA6 - 0.08R6 = 0$
- RA7: $RA7 - 0.08R7 = 0$
- RA8: $RA8 - 0.08R8 = 0$
- RA9: $RA9 - 0.08R9 = 0$
- RA10: $RA10 - 0.08R10 = 0$
- RA11: $RA11 - 0.08R11 = 0$
- RA12: $RA12 - 0.08R12 = 0$
- RA13: $RA13 - 0.08R13 = 0$
- RA14: $RA14 - 0.08R14 = 0$
- IA1: $IA1 - 0.611I1 = 0$
- IA2: $IA2 - 0.611I2 = 0$
- IA3: $IA3 - 0.611I3 = 0$
- IA4: $IA4 - 0.611I4 = 0$
- IA5: $IA5 - 0.611I5 = 0$
- IA6: $IA6 - 0.611I6 = 0$
- OA1: $OA1 - 0O1 = 0$
- OA2: $OA2 - 0O2 = 0$
- OA3: $OA3 - 0O3 = 0$
- OA4: $OA4 - 0O4 = 0$
- OA5: $OA5 - 0O5 = 0$
- OA6: $OA6 - 0O6 = 0$
- OA7: $OA7 - 0O7 = 0$
- OA8: $OA8 - 0O8 = 0$

Como se puede observar, la relación entre demanda y retorno en la actividad de ocio se representa con un retorno cero, tal y como se describió anteriormente para dicha actividad. La introducción del código responde a futuros escenarios en los que podrá introducirse retornos de agua en esta actividad.

En cuanto a los caudales ecológicos, se definen a continuación sus ecuaciones siguiendo los datos ofrecidos en la tabla de su apartado correspondiente:

- ECO1: $Q1 - QECO1 \geq 0$
- ECO2: $Q2 - QECO1 \geq 0$
- ECO3: $Q3 - QECO1 \geq 0$
- ECO4: $Q4 - QECO1 \geq 0$
- ECO5: $Q5 - QECO1 \geq 0$
- ECO6: $Q6 - QECO2 \geq 0$
- ECO7: $Q7 - QECO2 \geq 0$
- ECO8: $Q8 - QECO2 \geq 0$
- ECO9: $Q9 - QECO3 \geq 0$
- ECO10: $Q10 - QECO3 \geq 0$
- ECO11: $Q11 - QECO3 \geq 0$
- ECO12: $Q12 - QECO4 \geq 0$
- ECO13: $Q13 - QECO4 \geq 0$
- ECO14: $Q14 - QECO4 \geq 0$
- ECO15: $Q15 - QECO4 \geq 0$
- ECO16: $Q16 - QECO4 \geq 0$
- ECO17: $Q17 - QECO5 \geq 0$
- ECO18: $Q18 - QECO7 \geq 0$
- ECO19: $Q19 - QECO7 \geq 0$
- ECO20: $Q20 - QECO7 \geq 0$
- ECO21: $Q21 - QECO7 \geq 0$
- ECO22: $Q22 - QECO7 \geq 0$
- ECO23: $Q23 - QECO5 \geq 0$
- ECO24: $Q24 - QECO7 \geq 0$



- ECO25: Q25 - QECO7 ≥ 0
- ECO26: Q26 - QECO7 ≥ 0
- ECO27: Q27 - QECO5 ≥ 0
- ECO28: Q28 - QECO7 ≥ 0
- ECO29: Q29 - QECO7 ≥ 0
- ECO30: Q30 - QECO7 ≥ 0
- ECO31: Q31 - QECO7 ≥ 0
- ECO32: Q32 - QECO7 ≥ 0
- ECO33: Q33 - QECO5 ≥ 0
- ECO34: Q34 - QECO5 ≥ 0
- ECO35: Q35 - QECO5 ≥ 0
- ECO36: Q36 - QECO5 ≥ 0
- ECO37: Q37 - QECO5 ≥ 0
- ECO38: Q38 - QECO5 ≥ 0
- ECO39: Q39 - QECO5 ≥ 0
- ECO40: Q40 - QECO5 ≥ 0
- ECO41: Q41 - QECO5 ≥ 0
- ECO42: Q42 - QECO5 ≥ 0
- ECO43: Q43 - QECO5 ≥ 0
- ECO44: Q44 - QECO7 ≥ 0
- ECO45: Q45 - QECO7 ≥ 0
- ECO46: Q46 - QECO7 ≥ 0
- ECO47: Q47 - QECO5 ≥ 0
- ECO48: Q48 - QECO5 ≥ 0
- ECO50: Q50 - QECO5 ≥ 0
- ECO51: Q51 - QECO5 ≥ 0
- ECO53: Q53 - QECO5 ≥ 0
- ECO54: Q54 - QECO5 ≥ 0
- ECO55: Q55 - QECO5 ≥ 0
- ECO56: Q56 - QECO6 ≥ 0
- ECO57: Q57 - QECO6 ≥ 0
- ECO58: Q58 - QECO6 ≥ 0
- ECO59: Q59 - QECO6 ≥ 0
- ECO60: Q60 - QECO6 ≥ 0
- ECO61: Q61 - QECO6 ≥ 0
- ECO62: Q62 - QECO6 ≥ 0
- ECO63: Q63 - QECO6 ≥ 0
- ECO64: Q64 - QECO6 ≥ 0
- ECO65: Q65 - QECO5 ≥ 0
- ECO66: Q66 - QECO5 ≥ 0
- ECO67: Q67 - QECO5 ≥ 0
- ECO68: Q68 - QECO5 ≥ 0
- ECO69: Q69 - QECO5 ≥ 0
- ECO70: Q70 - QECO5 ≥ 0
- ECO71: Q71 - QECO5 ≥ 0
- ECO72: Q72 - QECO5 ≥ 0
- ECO75: Q75 - QECO5 ≥ 0
- ECO76: Q76 - QECO5 ≥ 0
- ECO79: Q79 - QECO5 ≥ 0
- ECO80: Q80 - QECO5 ≥ 0
- ECO81: Q81 - QECO5 ≥ 0
- ECO82: Q82 - QECO5 ≥ 0
- ECO85: Q85 - QECO5 ≥ 0
- ECO86: Q86 - QECO5 ≥ 0
- ECO89: Q89 - QECO5 ≥ 0
- ECO91: Q91 - QECO5 ≥ 0
- ECO93: Q93 - QECO5 ≥ 0
- ECO94: Q94 - QECO5 ≥ 0
- ECO95: Q95 - QECO5 ≥ 0
- QECO1: QECO1 = 4.7
- QECO2: QECO2 = 4.7
- QECO3: QECO3 = 3.2
- QECO4: QECO4 = 6.4
- QECO5: QECO5 = 9.5
- QECO6: QECO6 = 0.6
- QECO7: QECO7 = 1.6

Por último, es necesario definir la función objetivo que otorga el peso en términos de producción económica de cada una de las actividades. Esta función, a la vista de los factores productivos definidos anteriormente tiene la siguiente forma:

$$\text{Beneficio: } 93.5C_n + 0.92R_n + 1033I_n + 13.5O_n$$

Definido el modelo matemático se pueden estudiar a continuación los resultados obtenidos.



3.3.4. Resultados

- **Escenario actual**

Se muestra a continuación el resultado obtenido en la interfaz de R de la aplicación de las condiciones de contorno a la función objetivo *beneficio*, que pretende maximizar el beneficio económico en el modelo de la cuenca. Este modelo, debido a que se caracteriza con las restricciones reales de demanda hidráulica debe presentar un resultado económico ajustado al presentado en las cuentas de la demarcación, pudiendo existir variaciones en relación a las hipótesis tomadas para la generación del modelo.

C1	75.9000
C2	7.4000
C3	21.3000
C4	33.8000
C5	9.8000
C6	19.8000
C7	15.9000
C8	19.6000
C9	6.3000
C10	7.5000
C11	18.7000
R1	100.0875
R2	108.0000
R3	209.0000
R4	89.0000
R5	60.0000
R6	119.0000
R7	30.0000
R8	197.0000
R9	9.0000
R10	24.0000
R11	21.0000
R12	153.0000
R13	102.0000
R14	68.0000
I1	0.7000
I2	4.0000
I3	0.9000
I4	2.1000
I5	0.2000
I6	1.6000
O1	2.3600
O2	0.4600
O3	2.0400
O4	0.3200
O5	5.0000
O6	0.3600
O7	0.4000
O8	0.4000

Ilustración 37: Resultados del modelo de la cuenca del Segura (Fuente: elaboración propia)



Console ~/03_1 Master ICCP/TFM_Cuenca/R/	
Q1	26.9000
MUNDO	26.9000
Q2	322.0000
TRASVASE	322.0000
Q3	348.9000
Q4	342.6000
Q5	346.4493
CA9	3.8493
Q6	209.5000
SEGURA	209.5000
Q7	200.5000
Q8	201.2200
RA9	0.7200
Q9	65.0000
TAIBILLA	65.0000
Q10	63.4000
Q11	64.3776
IA6	0.9776
Q12	265.5976
Q13	157.5976
Q14	156.8976
Q15	165.5376
RA2	8.6400
Q16	165.9653
IA1	0.4277
Q17	512.4146
Q18	42.6000
ARGOS	42.6000
Q19	12.6000
Q20	5.1000
Q21	7.5000
RA7	2.4000
Q22	12.0825
CA10	4.5825
Q23	524.4971
Q24	43.0000
QUIPAR	43.0000
Q25	22.0000
Q26	23.6800

Ilustración 38: Resultados del modelo de la cuenca del Segura (Fuente: elaboración propia)

Console ~/03_1 Master ICCP/TFM_Cuenca/R/	
RA11	1.6800
Q27	548.1771
Q28	123.6000
JUDIO	123.6000
Q29	23.5125
Q30	16.1125
Q31	24.1195
RA1	8.0070
Q32	28.6409
CA2	4.5214
Q33	576.8180
Q34	572.8180
Q35	575.2620
IA2	2.4440
Q36	574.8620
Q37	574.8620
OA7	0.0000
Q38	421.8620
Q39	400.5620
Q40	412.8020
RA12	12.2400
Q41	425.8163
CA3	13.0143
Q42	425.4563
Q43	425.4563
OA6	0.0000
Q44	121.4000
MULA	121.4000
Q45	97.4000
Q46	99.3200
RA10	1.9200
Q47	524.7763
Q48	456.7763
Q49	76.8000
Q50	379.9763
Q51	447.9763
Q52	46.9248
IA3	0.5499
CA1	46.3749



Ilustración 39: Resultados del modelo de la cuenca del Segura (Fuente: elaboración propia)

Console ~/03_1 Master ICCP/TFM_Cuenca/R/	
Q53	494.9011
Q54	489.9011
Q55	489.9011
OA5	0.0000
Q56	297.7000
GUADALENTIN	297.7000
Q57	297.2400
Q58	297.2400
OA2	0.0000
Q59	100.2400
Q60	80.4400
Q61	96.2000
RA8	15.7600
Q62	108.2978
CA6	12.0978
Q63	107.8978
Q64	107.8978
OA8	0.0000
Q65	597.7989
Q66	508.7989
Q67	498.9989
Q68	506.1189
RA4	7.1200
Q69	512.1067
CA5	5.9878
Q70	511.7867
Q71	511.7867
OA4	0.0000
Q72	302.7867
Q73	52.7000
Q75	250.0867
Q74	18.7000
Q76	266.8067
RA3	16.7200
Q77	11.4257
CA11	11.4257
Q78	32.1997
CA4	20.6518
IA5	0.1222

Ilustración 40: Resultados del modelo de la cuenca del Segura (Fuente: elaboración propia)



Variable	Valor
CA4	20.6518
IA5	0.1222
Q79	299.0064
Q80	296.9664
Q81	296.9664
OA3	0.0000
Q82	194.9664
Q83	37.6000
Q85	157.3664
Q84	15.9000
Q86	165.5264
RA13	8.1600
Q87	9.7149
CA7	9.7149
Q88	22.9736
IA4	1.2831
CA8	11.9756
Q89	188.5000
Q90	179.0000
Q91	9.5000
Q92	14.3200
RA6	9.5200
RA5	4.8000
Q93	23.8200
Q94	21.4600
Q95	21.4600
OA1	0.0000
SALIDA	21.4600
RA14	5.4400
QEC01	4.7000
QEC02	4.7000
QEC03	3.2000
QEC04	6.4000
QEC05	9.5000
QEC07	1.6000
QEC06	0.6000
obj	33528.7265

Ilustración 41: Resultados del modelo de la cuenca del Segura (Fuente: elaboración propia)

A la vista de las imágenes anteriores (Ilustración 41) cabe destacar que el valor económico en la cuenca asciende a 33.528 millones de euros, valor prácticamente idéntico al presentado en el informe “Análisis académico del Plan Hidrográfico del Segura 2015.20210 a la luz de modernos conceptos de la ciencia de los recursos del agua” (Confederación Hidrográfica del Segura - Fundación Botín - Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, 2017), donde el valor es de 33.828 millones de euros, lo que supone una diferencia entre el valor real y el del modelo que no alcanza el 1%, dotando de validez al modelo generado.

Por otro lado, cabe destacar que las demandas obtenidas en el programa en los regadíos, que como se definió anteriormente, no serían fijas, sino que tendrían una posible variabilidad de hasta un 81% respecto a la demanda máxima, para hacer frente al déficit de recursos, son las siguientes:



Tabla 11: Demandas en regadíos (Fuente: elaboración propia)

Unidad	Rango de demanda (mín – max) del modelo (hm ³ /año)	Demanda obtenida (hm ³ /año)	Porcentaje de la demanda máxima
R1	98 – 122	100,0875	82 %
R2	87 – 108	108,0000	100 %
R3	209 – 259	209,0000	81 %
R4	89 – 110	89,0000	81 %
R5	60 – 75	60,0000	81 %
R6	119 – 148	119,0000	81 %
R7	24 – 30	30,0000	100 %
R8	197 – 244	197,0000	81 %
R9	7 – 9	9,0000	100 %
R10	24 – 30	24,0000	81 %
R11	21 – 27	21,0000	81 %
R12	153 – 190	153,0000	81 %
R13	102 – 126	102,0000	81 %
R14	55 – 68	68,0000	100 %

Como se puede observar, todos los valores en la actividad de riego se encuentran o bien en su límite mínimo de demanda permitida o bien en la demanda máxima. Aunque este reparto del recurso hídrico obedece a la búsqueda de la solución óptima en términos económicos, puede generar una problemática social derivada del hecho de que las demandas no se satisfagan por igual en todo el territorio de la cuenca.

A pesar de que el conjunto de la cuenca se ve favorecido por estas políticas, es interesante para lograr el bienestar social, mantener la cohesión en el territorio, por lo que pueden tomarse diferentes medidas para lograr dicho fin, manteniendo siempre como pilar base la no afección de los caudales ecológicos para la conservación del medio:

- Asumir una cierta pérdida económica en el conjunto de la cuenca a fin de mantener un equilibrio entre los recursos productivos en todas las zonas de riego de la cuenca, equilibrando la capacidad de producción de todos los regadíos. Aunque puede suponer una medida aceptable por aquéllos que ganan en capacidad de satisfacción de sus demandas, supone una reducción de la capacidad productiva en otras zonas.
- Lograr llevar a cabo una mejora de la productividad en el resto de las actividades, especialmente en el abastecimiento urbano, que permita lograr una disminución de sus demandas al mismo tiempo que se logre aumentar la capacidad de abastecimiento en los regadíos, sin tener como consecuencia una reducción en el resultado de la función objetivo de la cuenca.
La reducción en la demanda urbana sin pérdida de productividad puede entenderse como medidas de concienciación en la población para el ahorro de agua doméstica, así como la implementación de comercios y hostelería de medidas de sistemas de ahorro de agua, de forma que, con una menor demanda, no se pierda capacidad de atracción turística urbana.
- Aumentar la capacidad de reutilización de los recursos empleados en las actividades y mejorar la capacidad de desalinización en la cuenca, de forma que se disponga de más recursos que permitan lograr satisfacer la demanda.



Aunque el modelo generado no contempla el destino concreto del recurso, sino su simple introducción a la red -valorando únicamente que las ciudades se disponen antes que el resto de actividades para limitar el uso de agua reciclada-, en la realidad, la obtención de más recursos a través de la reutilización es especialmente beneficioso para la actividad del regadío, pues prácticamente el 80% del agua reutilizada va a parar a la agricultura y el resto al riego de campos de golf más un pequeño porcentaje al riego de parques y jardines urbanos.

Además, hay que tener en cuenta, que mientras que esta medida supone un aumento de los recursos a corto plazo, en el medio y largo plazo puede constituir simplemente una medida para mantener los recursos, pues si se tiene en cuenta que la Región de Murcia se encuentra en una de las zonas de más afección por cambio climático de la Península Ibérica, previsiblemente sus fuentes naturales de agua dispondrán cada vez de menos recursos.

- Como medida transversal y necesaria se debería llevar a cabo un control más exhaustivo de los riegos ilegales, lo que permitiría monetizar el uso del agua que actualmente se encuentra dentro de la conocida como “*economía sumergida*” y disponer de más recursos para aquellas explotaciones que cumplen con la legalidad. Esta problemática está urgente de intervención, pues tiene una incidencia creciente, con un incremento de casos detectados de derivación ilegal de agua entre los años 2016 y 2017 de un 38% en la cuenca, especialmente en el campo de Cartagena, precisamente una de las zonas en las que el modelo indica que sólo puede cubrirse el 81% de la demanda.
- Una medida con posible aplicación en la cuenca sería la disposición de un mayor número de embalses, pues la capacidad de almacenamiento de la cuenca es de 1.140 hm³, inferior incluso a la suma de los embalses de Entrepeñas y Buendía, que abastecen externamente a la cuenca. Este hecho es especialmente notable en una cuenca caracterizada por sufrir eventos extremos cada año. Un aumento de su capacidad reguladora intra e interanualmente podría ser altamente beneficioso, pues permitiría almacenar agua en los meses invernales donde pueden producirse etapas de superávit en la cuenca por una mayor cantidad de agua disponible naturalmente (asociada a mayores precipitaciones) y por una menor demanda relacionada con la reducción del turismo y con la menor necesidad de riego agrícola y de los campos de golf.

Sin embargo, en este trabajo no se trata la capacidad reguladora de los embalses en la cuenca, lo cual es una limitación en el trabajo, pues se valora la cuenca como deficitaria en cuanto a volumen de agua disponible anualmente.

- **Máximo beneficio**

En primer lugar, al igual que en el caso teórico, se va a comprobar cuál es la mayor capacidad productiva a nivel económico de la cuenca. Para ello, a la vista de los resultados obtenidos en el caso teórico y, teniendo en cuenta que se estudia ahora un caso real, se va a imponer como restricción mínima de demanda en cada una de las actividades la demanda actual que presentan (el valor mínimo del rango en el caso de la agricultura), al contrario que en el caso teórico, donde se permitió total libertad al programa a la hora de distribuir óptimamente los consumos, dejando actividades sin caudal.

Los resultados obtenidos en comparación con el caso inicial son los siguientes:



Tabla 12: Comparativa de resultados del caso de referencia y del caso de máximo beneficio en la cuenca (Fuente: elaboración propia)

UNIDAD	CASO REAL (REF.)		CASO MÁX BENEFICIO		VARIACIÓN
	HM3	M €	HM3	M €	
C1	75,90	7.096,65	75,90	7.096,65	0,00%
C2	7,40	691,90	7,40	691,90	0,00%
C3	21,30	1.991,55	21,30	1.991,55	0,00%
C4	33,80	3.160,30	33,80	3.160,30	0,00%
C5	9,80	916,30	9,80	916,30	0,00%
C6	19,80	1.851,30	19,80	1.851,30	0,00%
C7	15,90	1.486,65	15,90	1.486,65	0,00%
C8	19,60	1.832,60	19,60	1.832,60	0,00%
C9	6,30	589,05	6,30	589,05	0,00%
C10	7,50	701,25	7,50	701,25	0,00%
C11	18,70	1.748,45	18,70	1.748,45	0,00%
TOTAL CIUDADES	236,00	22.066,00	236,00	22.066,00	0,00%
R1	100,09	116,10	98,00	113,68	-2,09%
R2	108,00	125,28	87,00	100,92	-19,44%
R3	209,00	242,44	209,00	242,44	0,00%
R4	89,00	103,24	89,00	103,24	0,00%
R5	60,00	69,60	60,00	69,60	0,00%
R6	119,00	138,04	119,00	138,04	0,00%
R7	30,00	34,80	24,00	27,84	-20,00%
R8	197,00	228,52	197,00	228,52	0,00%
R9	9,00	10,44	7,00	8,12	-22,22%
R10	24,00	27,84	24,00	27,84	0,00%
R11	21,00	24,36	21,00	24,36	0,00%
R12	153,00	177,48	153,00	177,48	0,00%
R13	102,00	118,32	102,00	118,32	0,00%
R14	68,00	78,88	467,08	541,81	586,88%
TOTAL REGADÍOS	1.289,09	1.495,34	1.657,08	1.922,21	28,55%
I1	0,70	723,10	0,70	723,10	0,00%
I2	4,00	4.132,00	4,00	4.132,00	0,00%
I3	0,90	929,70	0,90	929,70	0,00%
I4	2,10	2.169,30	2,10	2.169,30	0,00%
I5	0,20	206,60	73,72	76.156,00	36761,57%
I6	1,60	1.652,80	1,60	1.652,80	0,00%
TOTAL INDUSTRIA	9,50	9.813,50	83,02	85.762,90	773,93%
O1	2,36	31,86	14,32	193,32	506,78%
O2	0,46	6,21	0,46	6,21	0,00%
O3	2,04	27,54	2,04	27,54	0,00%
O4	0,32	4,32	0,32	4,32	0,00%
O5	5,00	67,50	5,00	67,50	0,00%
O6	0,36	4,86	0,36	4,86	0,00%
O7	0,40	5,40	0,40	5,40	0,00%
O8	0,40	5,40	0,40	5,40	0,00%
TOTAL OCIO	11,34	153,09	23,30	314,55	105,47%
BENEFICIO	1.545,93	33.527,93	1.999,40	110.065,66	228,28%



Como se observa en la tabla anterior, se produciría un incremento notable, superior al 200% en el beneficio económico de la cuenca, pasando de 33.500 millones de euros en el caso de referencia a más de 110.000 millones en el caso de máximo beneficio.

La distribución óptima de recursos obtenida se produciría sin variación sobre el caso real en el abastecimiento de los núcleos urbanos y con aumentos considerables en industria y ocio, por ser las actividades más rentables, pero también en los regadíos. Sin embargo, el análisis de los resultados en la tabla anterior pone de manifiesto que el incremento sustancial en las tres actividades se produce por un incremento desmesurado en una única unidad de demanda de cada una de las actividades, lo cual no tiene sentido en la realidad, pues supondría un desequilibrio total entre zonas, que requeriría la construcción de infraestructuras de abastecimiento y saneamiento excepcionales para dichas unidades.

Además, cabe resaltar que la nueva distribución de recursos permitiría aumentar el caudal total con el que se dotaría la agricultura, a pesar de ser la actividad menos rentable y de ver reducida su dotación en 4 de las 14 unidades de demanda, gracias al aumento en el abastecimiento en la unidad de demanda de los campos de la Vega Media.

Por ello, esta solución en el modelo sólo supondría un aumento de la problemática existente en la cuenca definida en los primeros capítulos del trabajo, pues no sólo no aminoraría el reparto desigual del recurso agua, sino que también supondría incrementar el estrés en el suelo por su sobreutilización agrícola en ciertas zonas, que podría tener como consecuencia la despoblación de aquellas menos favorecidas, además de la pérdida de productividad en el medio plazo de aquellas sobreexplotadas por la salinización del suelo.

Además, el aumento de producción puntual en ciertas zonas industriales podría agravar la capacidad de saneamiento y con ello la calidad de las aguas. Sería necesario, como se ha mencionado anteriormente adaptar las infraestructuras a niveles de exigencia extremadamente superiores a los existentes actualmente.

Por último, hay que considerar que esta situación aumentaría el consumo total en la cuenca, lo que teniendo presente el incremento de las temperaturas y la reducción de precipitaciones en la región de Murcia como consecuencia del agravamiento del cambio climático, no sería viable.

En definitiva, la adopción de esta solución, fundamentada únicamente en el rendimiento económico, que a la vista de lo definido anteriormente sólo se daría en un período cortoplacista, es totalmente inviable y sólo tiene sentido su estudio a nivel teórico.

- **Equilibrio en el abastecimiento de los regadíos**

Como se ha visto anteriormente, el modelo de la cuenca del Segura de referencia generado presenta diferencias en la capacidad de abastecer las demandas de las diferentes unidades de regadío modeladas, comprendiéndose todos los valores bien en el extremo inferior (81% de la demanda), o bien en el extremo superior (100% de la demanda) del rango establecido.

Esta situación contemplada en el modelo mediante la determinación de un rango de satisfacción de las demandas es reflejo de lo que acontece realmente, donde el riego de la agricultura es el principal afectado por la regulación en el uso del agua en la cuenca.



Esta situación, como se mencionó anteriormente, radica en un problema de cohesión social pues la agricultura tiene gran arraigo en la cuenca, pero su actividad directa y los trabajos que de ella dependen se ven afectados por este sistema regulatorio que no les es beneficioso en comparación con otros sectores más productivos económicamente como la industria.

Sin embargo, como se desprende de los resultados del modelo, no sólo se trata de un problema entre diferentes actividades productivas, sino también entre las diferentes zonas de cultivo, que cuentan con mayor o menor porcentaje de abastecimiento. Es decir, ciertas zonas agrarias se ven más favorecidas a nivel de disposición de recursos que otras dentro de la misma unidad administrativa, lo cual puede generar conflictos sociales.

Se podría considerar una distribución de los recursos por zonas agrarias más equitativo beneficiando aquellos cultivos que son más productivos para la cuenca económicamente. Pero, dado que en este trabajo no se considera la productividad económica de cada uno de los cultivos porque incrementaría la complejidad del modelo mucho más allá de lo necesario -así como de los diferentes procesos industriales o de los comercios urbanos-, se propone como solución para solventar la problemática social que puede derivarse de los diferentes grados de cumplimiento con las demandas, el establecimiento de un rango de satisfacción más ajustado, que tenga una variación de los valores de únicamente un 5% (81 – 86%), frente al 19% anterior (81 – 100%). Esta medida supone reducir ligeramente el abastecimiento de las zonas con más demanda y aumentar las zonas que estaban menos beneficiadas. Además, como consecuencia secundaria puede producirse una reducción en el beneficio económico de la cuenca, porque al buscar el ajuste de los caudales, los cuales deben cumplir con los caudales ecológicos, puede tenerse una pérdida global en el agua utilizada por la agricultura, lo cual, en cambio puede suponer un beneficio ambiental para la cuenca, pues se reduciría la presión sobre los cultivos más utilizados y permitiría equilibrar en cierta medida la disponibilidad de agua en la cuenca, reduciendo el déficit hídrico que tiende a su incremento como consecuencia del cambio climático.

Tabla 13: Resultados del caso de equilibrio de los recursos en la actividad agraria (Fuente: elaboración propia)

UNIDAD	CASO REAL (REF.)		CASO EQ. REGADÍOS		VARIACIÓN
	HM3	M €	HM3	M €	
R1	100,09	116,10	105,00	121,80	4,91%
R2	108,00	125,28	93,00	107,88	-13,89%
R3	209,00	242,44	209,00	242,44	0,00%
R4	89,00	103,24	90,09	104,50	1,22%
R5	60,00	69,60	60,00	69,60	0,00%
R6	119,00	138,04	119,00	138,04	0,00%
R7	30,00	34,80	26,00	30,16	-13,33%
R8	197,00	228,52	197,00	228,52	0,00%
R9	9,00	10,44	7,50	8,70	-16,67%
R10	24,00	27,84	26,00	30,16	8,33%
R11	21,00	24,36	23,00	26,68	9,52%
R12	153,00	177,48	163,50	189,66	6,86%
R13	102,00	118,32	102,00	118,32	0,00%
R14	68,00	78,88	58,00	67,28	-14,71%
TOTAL REGADÍOS	1.289,09	1.495,34	1.279,09	1.483,74	-0,78%
BENEFICIO	1.545,93	33.527,93	1.535,93	33.516,33	-0,03%



En la tabla de resultados, puede observarse cómo se produce un equilibrio en la demanda de los caudales, reduciéndose en las zonas donde alcanzaba el 100% de la demanda y pudiendo abastecer con más recursos las zonas que presentaban menor satisfacción de la demanda. Este equilibrio en la cuenca, libera del estrés hídrico que sufren las zonas más demandadas, sin suponer grandes pérdidas en el global económico de la cuenca, pues, mientras que el resultado total en la actividad del regadío supone una pérdida de un 0,78% respecto al valor de referencia, el beneficio total de la cuenca sólo disminuye un 0,03%.

Sin embargo, a pesar de que estas medidas supongan un equilibrio entre zonas agrarias, sigue sin resolver la problemática existente entre diferentes actividades. Por ello, se plantea a continuación la búsqueda de una reducción de la demanda de las ciudades compensada con un aumento de la demanda.

- **Reducción de la demanda urbana**

De acuerdo con los resultados del escenario anterior, la agricultura, a pesar de ser la actividad que más recursos hídricos consume, no es capaz de satisfacer el 100% de su demanda debido a un modelo que favorece las actividades más rentables económicamente en la cuenca (actividad urbana-comercial, industria y ocio).

Se va a tratar en este apartado el caso de una reducción en la demanda urbana con un aumento proporcional de su productividad, amparada en una mejora tecnológica posible en el medio plazo que busca tanto reducir el consumo de agua en las ciudades -lo cual supone una inversión necesaria para las futuras condiciones de mayor escasez de recursos-, como poder aumentar al mismo tiempo los recursos destinados a la agricultura.

El valor utilizado en el caso real como factor productivo de la actividad urbana era de 93,51 €/m³, con una demanda total de 236 hm³. Según los valores recomendados por la ONU, el consumo en los hogares españoles debería reducirse al menos un 25% para poder afrontar los retos del futuro. De acuerdo con este valor, se va a reducir la demanda urbana en el modelo hasta un valor de 177 hm³, aumentando su factor productivo hasta los 124,66€/m³ para compensar las pérdidas. Se va a evaluar en dos fases sucesivas, viendo en primer lugar cuál sería la consecuencia económica de la reducción de la demanda y cómo se redistribuirían los recursos en los regadíos y, en segundo lugar, aplicando el factor productivo para recuperar el beneficio económico existente en la cuenca.

Los resultados con reducción de la demanda urbana comparados con las hipótesis del equilibrio en los regadíos son los siguientes:



Tabla 14: Resultados del caso de reducción de demanda en las actividades urbanas (Fuente: elaboración propia)

UNIDAD	CASO EQ. REGADÍOS		CASO REDUCCIÓN DEM.		VARIACIÓN
	HM3	M €	HM3	M €	
C1	75,90	7.096,65	56,90	5.320,15	-25,03%
C2	7,40	691,90	5,60	523,60	-24,32%
C3	21,30	1.991,55	16,00	1.496,00	-24,88%
C4	33,80	3.160,30	25,30	2.365,55	-25,15%
C5	9,80	916,30	7,30	682,55	-25,51%
C6	19,80	1.851,30	14,90	1.393,15	-24,75%
C7	15,90	1.486,65	12,00	1.122,00	-24,53%
C8	19,60	1.832,60	14,70	1.374,45	-25,00%
C9	6,30	589,05	4,70	439,45	-25,40%
C10	7,50	701,25	5,60	523,60	-25,33%
C11	18,70	1.748,45	14,00	1.309,00	-25,13%
TOTAL CIUDADES	236,00	22.066,00	177,00	16.549,50	-25,00%
R1	105,00	121,80	105,00	121,80	0,00%
R2	93,00	107,88	93,00	107,88	0,00%
R3	209,00	242,44	216,53	251,17	3,60%
R4	90,09	104,50	94,50	109,62	4,90%
R5	60,00	69,60	60,00	69,60	0,00%
R6	119,00	138,04	119,00	138,04	0,00%
R7	26,00	30,16	26,00	30,16	0,00%
R8	197,00	228,52	210,00	243,60	6,60%
R9	7,50	8,70	7,50	8,70	0,00%
R10	26,00	30,16	26,00	30,16	0,00%
R11	23,00	26,68	23,00	26,68	0,00%
R12	163,50	189,66	163,50	189,66	0,00%
R13	102,00	118,32	102,00	118,32	0,00%
R14	58,00	67,28	58,00	67,28	0,00%
TOTAL REGADÍOS	1.279,09	1.483,74	1.304,03	1.512,67	1,95%
BENEFICIO	1.535,93	33.516,33	1.501,87	28.028,76	-16,37%

La tabla muestra una reducción notable en el beneficio económico de la cuenca. La disminución de un 25% de los beneficios producidos en las actividades urbanas supone una reducción total del beneficio del 16,4%, reducido en cierta forma por el un pequeño aumento del 2% en la actividad agraria repartido en tres unidades, dos de las cuales no habían sido favorecidas anteriormente por la anterior distribución de recursos, lo que permitiría un reparto más justo entre zonas y actividades tal y como se quería realizar.

Si, a través del avance tecnológico y la atracción de actividad comercial y turística con un alto grado de concienciación hacia el respeto por los recursos hídricos escasos en la cuenca, se logra aumentar la productividad de la actividad que se desarrolla en las urbes de forma inversamente proporcional a la disminución de la demanda, se logrará en la cuenca mantener el beneficio



económico actual, pudiendo realizar una distribución más justa de los recursos en la cuenca que permita mantener cohesionada la zona geográfica que abarca, manteniendo como pilares el equilibrio ambiental y social sin descuidar el económico. Se muestra a continuación el resultado del aumento en la productividad de los recursos hídricos en la actividad urbana comparándolo nuevamente con el caso del equilibrio en el abastecimiento de los regadíos.

Tabla 15: Resultados del caso de reducción de demanda y aumento de la productividad en las actividades urbanas
(Fuente: elaboración propia)

UNIDAD	CASO EQ. REGADÍOS		CASO REDUCCIÓN DEM.		VARIACIÓN
	HM3	M €	HM3	M €	
C1	75,90	7.096,65	56,90	7.093,15	-0,05%
C2	7,40	691,90	5,60	698,10	0,90%
C3	21,30	1.991,55	16,00	1.994,56	0,15%
C4	33,80	3.160,30	25,30	3.153,90	-0,20%
C5	9,80	916,30	7,30	910,02	-0,69%
C6	19,80	1.851,30	14,90	1.857,43	0,33%
C7	15,90	1.486,65	12,00	1.495,92	0,62%
C8	19,60	1.832,60	14,70	1.832,50	-0,01%
C9	6,30	589,05	4,70	585,90	-0,53%
C10	7,50	701,25	5,60	698,10	-0,45%
C11	18,70	1.748,45	14,00	1.745,24	-0,18%
TOTAL CIUDADES	236,00	22.066,00	177,00	22.064,82	-0,01%
R1	105,00	121,80	105,00	121,80	0,00%
R2	93,00	107,88	93,00	107,88	0,00%
R3	209,00	242,44	216,53	251,17	3,60%
R4	90,09	104,50	94,50	109,62	4,90%
R5	60,00	69,60	60,00	69,60	0,00%
R6	119,00	138,04	119,00	138,04	0,00%
R7	26,00	30,16	26,00	30,16	0,00%
R8	197,00	228,52	210,00	243,60	6,60%
R9	7,50	8,70	7,50	8,70	0,00%
R10	26,00	30,16	26,00	30,16	0,00%
R11	23,00	26,68	23,00	26,68	0,00%
R12	163,50	189,66	163,50	189,66	0,00%
R13	102,00	118,32	102,00	118,32	0,00%
R14	58,00	67,28	58,00	67,28	0,00%
TOTAL REGADÍOS	1.279,09	1.483,74	1.304,03	1.512,67	1,95%
BENEFICIO	1.535,93	33.516,33	1.501,87	33.544,08	0,08%

Como se puede observar en la tabla, se recupera, con el aumento de la productividad en las actividades urbanas, el valor del beneficio en la cuenca para el caso del equilibrio entre zonas agrarias



Con la actual distribución de recursos se logra mantener un reparto más equilibrado entre las diferentes actividades que permite una mayor cohesión en el territorio, con una menor sobreexplotación de los suelos, manteniendo en todo momento un caudal que beneficia la conservación de los procesos biológicos en la cuenca.

Se muestra a continuación otro de los escenarios que se pueden desarrollar a medio plazo con la inversión necesaria de los agentes afectados, que puede mejorar la capacidad económica, hidrológica y ambiental de la cuenca, como es el aumento de la reutilización en la cuenca.

- **Aumento de la capacidad de reutilización**

Como expresó la profesora Akissa Bahri, ganadora en 2018 del premio Woman Award de la International Water Association: *“Sin reutilización, el tratamiento de las aguas residuales tiene un valor ambiental, pero no tiene valor financiero”*. Esta frase encaja directamente con los objetivos perseguidos en este TFM, en los que se busca el desarrollo del potencial económico a través de las políticas hídricas en una cuenca, con el foco también puesto en el respeto ambiental. Justo en ese punto encaja el presente escenario, donde se va a observar la nueva distribución de recursos y el beneficio económico derivado a través de las mejoras en la reutilización del agua empleado en las diferentes actividades.

Según los datos ofrecidos por los recursos oficiales de la cuenca del Segura, los valores de reutilización en las diferentes actividades para el horizonte 2033 vienen dados por las mejoras en las tecnologías de reutilización principalmente para las actividades desarrolladas por la industria y las ciudades. El nuevo valor de reutilización previsto es un 28% superior al actual.

Se va a considerar en el presente escenario la hipótesis de un esfuerzo importante de las administraciones hidráulicas de la cuenca por desarrollar las mejoras en la capacidad de tratamiento por parte de las EDAR y reutilización en la cuenca de los recursos utilizados en las actividades urbanas e industriales, con un aumento del 28% en su coeficiente de devolución de agua a la red. Además, como medida complementaria se propone aumentar un 5% y 4% los límites inferior y superior, respectivamente, impuestos de capacidad de satisfacción de la demanda en los regadíos (86% - 90%), pues ya en el escenario anterior, prácticamente todos han llegado al valor del 86% y con el nuevo escenario de mayor devolución de agua a la red lo único que se ha logrado es un aumento del caudal de salida, lo que equivale a perder en su salida al mar un potencial beneficio económico en las actividades en la cuenca. Además, se consigue de esta forma, aumentar los recursos en los regadíos al tiempo que se logra reducir más la brecha de satisfacción de demanda entre zonas. Se muestran a continuación los resultados obtenidos en el presente escenario:



Tabla 16: Resultados del caso de reducción de demanda y aumento de la productividad en las actividades urbanas
(Fuente: elaboración propia)

UNIDAD	RED. DEM.URBANA		MEJORA REUTILIZACION		VARIACIÓN
	HM3	M €	HM3	M €	
R1	105,00	121,80	107,69	124,92	2,56%
R2	93,00	107,88	97,20	112,75	4,52%
R3	222,50	258,10	222,70	258,33	0,09%
R4	94,50	109,62	94,60	109,74	0,11%
R5	64,50	74,82	64,50	74,82	0,00%
R6	127,50	147,90	127,50	147,90	0,00%
R7	26,00	30,16	27,00	31,32	3,85%
R8	210,00	243,60	210,00	243,60	0,00%
R9	7,50	8,70	8,10	9,40	8,00%
R10	26,00	30,16	26,00	30,16	0,00%
R11	23,00	26,68	23,20	26,91	0,87%
R12	163,00	189,08	163,40	189,54	0,25%
R13	108,00	125,28	108,30	125,63	0,28%
R14	58,50	67,86	61,20	70,99	4,62%
TOTAL REGADÍOS	1.329,00	1.541,64	1.341,39	1.556,01	0,93%
BENEFICIO	1.526,84	33.573,05	1.539,23	33.587,42	0,04%

A la hora de entender estos resultados hay que tener en cuenta que esta medida propuesta parte de una reducción de la demanda urbana tomada en el escenario anterior, por lo que el agua que se reutiliza será menor que el que podría tenerse si se realizase directamente la aplicación de esta medida sobre el modelo del escenario real.

Si bien se consigue con esta medida una mejora en el beneficio económico, la mejora tiene un carácter más social que económico a la vista del resultado del beneficio en la cuenca, pues únicamente logra incrementarlo en un 0,04% respecto al escenario anterior, dado que los recursos extras de los que se dispone son utilizados en la actividad menos rentable en la cuenca.

- **Escenarios de incremento del beneficio económico**

Las medidas anteriormente tomadas en cuanto a política hidrológica se han basado principalmente en lograr una equidad en cuanto a la distribución de recursos entre actividades y entre zonas, tratando de lograr que, a pesar de hacer frente a una cuenca deficitaria en cuanto a recursos hídricos, se satisfaga la demanda de todas las actividades en la mayor medida.

Estas medidas se fundamentan en lograr un equilibrio social y ambiental que establezca una cuenca que tiende a la despoblación de sus zonas rurales y a la masificación y sobreexplotación de las zonas más pobladas e industrializadas.

Sin embargo, este trabajo también debe poner el foco en el aspecto económico, pues el aumento de la capacidad económica también se constituye posteriormente en futuras inversiones que mantengan una cuenca próspera a medio y largo plazo.



Con la actual distribución de recursos en cabecera, se llega a una demanda en las actividades y, por lo tanto, a un beneficio económico, que permanece estable a pesar de incrementar la capacidad de satisfacción de la demanda en los regadíos. Esta situación viene determinada porque los regadíos que se encuentran en el límite inferior de satisfacción de demanda agotan los recursos en la zona del curso en que se encuentran, dejando sin utilizar únicamente el correspondiente al caudal ecológico, pero al mismo tiempo, se cuenta con un caudal de salida de la cuenca que va a parar directamente

Para mejorar el beneficio en la cuenca con los recursos actuales se pueden considerar algunas alternativas como la flexibilidad en la aportación de los recursos en las cabeceras. Esta medida que debería contar con una alta inversión en cuanto a canalización podría permitir a los cursos de la cuenca más explotados, considerando así a aquellos que presentan en algún punto un caudal igual al caudal ecológico, tener más margen de explotación.

Por ejemplo, zonas de la red como la de la Rambla del Judío, explotan al máximo sus recursos, encontrándose el regadío 1 en el umbral inferior de satisfacción de demanda. Si se crea un conjunto de conexiones entre partes de la cuenca que permitan satisfacer la demanda allá donde más sea necesario podría hacerse frente a esta situación, por ejemplo, transportando parte del agua del trasvase hacia esa zona. Este tipo de gestión flexible podría enmarcarse en un marco integral en la cuenca y permitiría que, cuanto más interconectada estuviera la cuenca, la demanda fuera gestionada próxima al tiempo real, especialmente en las épocas de mayores sequías o mayores avenidas, que permitirían junto con la gestión de la capacidad de los embalses hacer frente de una manera más eficiente a estos fenómenos.

Con la actual distribución de recursos podría evaluarse también como medida de crecimiento económico en la cuenca la posibilidad de aumento de la demanda en las actividades más rentables, como la industria o el ocio. Si bien estas medidas se opondrían a parte del razonamiento de equidad del territorio expuesto anteriormente en el trabajo, puede resultar interesante su estudio, para ver en los términos actuales de cumplimiento de la demanda en los regadíos, conocer cuáles y hasta qué punto pueden crecer las industrias y centros de ocio existentes y qué beneficio económico se puede extraer de este crecimiento.

Para estudiarlo dentro de unos términos razonables, se va a introducir dentro del modelo una capacidad de aumento de la demanda en la industria y ocio de la cuenca de un 10% adicional al estudiado en el último escenario de aumento de la reutilización y de la satisfacción de demanda en regadíos. Los resultados se muestran a continuación:



Tabla 17: Resultados del caso de aumento de demanda en actividades más rentables (Fuente: elaboración propia)

UNIDAD	MEJORA REUTILIZACIÓN		AUM. DEM. INDUS - OCIO		VARIACIÓN
	HM3	M €	HM3	M €	
R1	107,69	124,92	106,48	123,52	-1,12%
R2	97,20	112,75	97,20	112,75	0,00%
R3	222,70	258,33	222,70	258,33	0,00%
R4	94,60	109,74	94,60	109,74	0,00%
R5	64,50	74,82	64,50	74,82	0,00%
R6	127,50	147,90	127,50	147,90	0,00%
R7	27,00	31,32	27,00	31,32	0,00%
R8	210,00	243,60	209,80	243,37	-0,10%
R9	8,10	9,40	8,10	9,40	0,00%
R10	26,00	30,16	25,80	29,93	-0,77%
R11	23,20	26,91	23,20	26,91	0,00%
R12	163,40	189,54	163,40	189,54	0,00%
R13	108,30	125,63	108,30	125,63	0,00%
R14	61,20	70,99	61,20	70,99	0,00%
TOTAL REGADÍOS	1.341,39	1.556,01	1.339,78	1.554,14	-0,12%
I1	0,70	723,10	0,77	795,41	10,00%
I2	4,00	4.132,00	4,40	4.545,20	10,00%
I3	0,90	929,70	0,99	1.022,67	10,00%
I4	2,10	2.169,30	2,31	2.386,23	10,00%
I5	0,20	206,60	0,22	227,26	10,00%
I6	1,60	1.652,80	1,76	1.818,08	10,00%
TOTAL INDUSTRIA	9,50	9.813,50	10,45	10.794,85	10,00%
O1	2,36	31,86	2,60	35,10	10,17%
O2	0,46	6,21	0,51	6,89	10,87%
O3	2,04	27,54	2,24	30,24	9,80%
O4	0,32	4,32	0,35	4,73	9,37%
O5	5,00	67,50	5,50	74,25	10,00%
O6	0,36	4,86	0,40	5,40	11,11%
O7	0,40	5,40	0,44	5,94	10,00%
O8	0,40	5,40	0,44	5,94	10,00%
TOTAL OCIO	11,34	153,09	12,48	168,48	10,05%
BENEFICIO	1.539,23	33.587,42	1.539,71	34.582,29	2,96%

A la vista de los resultados anteriores (se excluyen las demandas urbanas por no existir cambios) se puede observar que el aumento de un 10% en la capacidad de explotación en las actividades más rentables, industria y ocio, daría como resultado prácticamente un 3% de incremento en el beneficio de la cuenca, sin que ello suponga un aumento del caudal necesario, sino que redistribuiría parte de la demanda de los regadíos hacia estas actividades.



Si este rango superior de demanda en dichas actividades se incrementase aún más, continuaría creciendo la redistribución de recursos hasta el punto en el que el caudal de salida fuese equivalente al caudal ecológico en dicha zona y la última actividad de ocio dispuesta en la red (O'1) sería la gran beneficiada.

Estas actividades tienen una demanda tan pequeña y una rentabilidad tan alta en comparación con la demanda urbana y la demanda agraria, que la propia administración asegura la satisfacción de la demanda en estas zonas frente a la demanda agraria.

3.3.5. Enfoques futuros

Además de los escenarios planteados anteriormente en el modelo, la capacidad de análisis de éste podría ampliarse a la definición de otros escenarios con nuevas condiciones de contorno o la adopción de nuevas medidas hídricas.

Entre estos escenarios cabe destacar el escenario futuro de reducción en la disposición de recursos como consecuencia del proceso de calentamiento asociado al cambio climático.

Particularmente, en la cuenca del Segura, este hecho adquiere una relevancia fundamental, pues según los datos de la propia cuenca, 40 de las 63 masas de aguas subterráneas se encuentran bajo riesgo asegurado de sobreexplotación y se producirá una reducción de las masas superficiales de hasta el 40%. Esta situación, puede condicionar también el volumen de agua trasvasada entre el Tajo y el Segura, pues según el profesor de la Universidad de Murcia F. Pellicer, no será posible trasvasar caudal entre cuencas para el año 2070.

Este escenario podría reflejarse en el modelo con la simple reducción de los recursos en las cabeceras de acuerdo con los nuevos volúmenes disponibles para analizar cómo respondería económicamente la cuenca y qué actividades podrían verse más amenazadas por estos cambios.

Los nuevos paradigmas climáticos conllevarán en el futuro nuevas políticas hídricas para que la situación pueda mitigarse en la medida de lo posible. Una de las alternativas podría ser llevar a cabo el recrecido de embalses para que situaciones como la ocurrida en el año 2013, en el cual los embalses alcanzaron su máximo de capacidad, puedan ser de utilidad en años sucesivos, que presentan el característico déficit de recursos de la cuenca. Dado que no se ha modelado la capacidad de los embalses en la cuenca, podría modelarse la nueva capacidad de los embalses como nuevas entradas de caudal en caudal o entradas más altas en las existentes.

Además, con relación a la mitigación del cambio climático en los embalses también se están llevando a cabo nuevas medidas que buscan la reducción de la evaporación en los mismos, en escenarios con previsiones de aumentos notables de temperatura. Las estimaciones actuales de pérdidas por evaporación en la cuenca en embalses son de 58 hm³. Este volumen podría emplearse en continuar reduciendo el déficit existente en la actividad agraria en la cuenca o valorando el último escenario modelado podría ser interesante el posible crecimiento de las zonas industriales o de ocio en la cuenca.

Algunas de las medidas actuales que se están utilizando para llevar a cabo la reducción de la evaporación en los embalses son las siguientes:



- **Shade balls:** esta propuesta fue ampliamente probada en los embalses californianos durante la sequía del año 2015. Consiste en el vertido de unas pelotas de color negro de tamaño similar a pelotas de tenis que evitan la radiación directa del sol sobre el agua, reduciendo en gran medida la evaporación. Además, dado que el agua para consumo contiene cloro evita la producción de bromatos cancerígenos al no reducir la radiación del sol.
- **Paneles fotovoltaicos flotantes:** esta medida no sólo reduce la evaporación, sino que constituye una fuente de energía limpia que además puede revertir en beneficios para la cuenca.

A pesar de lo mencionado anteriormente entre el trasvase Tajo-Segura, que podría ver limitadas el volumen intercambiado para el año 2070, puede ser interesante para mantener la actividad social y económica en la cuenca nuevos trasvases de agua con cuencas que presenten superávit de recursos. Cuencas como las del Norte, el Duero o la del Ebro presentan un superávit superior no sólo al déficit de la cuenca del Segura, sino a toda la demanda que presenta la cuenca.

Si bien esta medida es muy interesante a nivel académico, la infraestructura necesaria para interconectar las cuencas del Norte de España con las del Sur, supone un gasto inabordable para los presupuestos de las administraciones del Estado.

Otra medida puede ser el uso creciente de la desalinización de aguas costeras para reducir el estrés sobre acuíferos y masas superficiales de agua dulce. Se trata de una medida que además podría paliar el problema directamente sobre las zonas más afectadas, pues las zonas costeras de la cuenca son las que más estrés hídrico pueden sufrir durante los períodos estivales.



4. CONCLUSIONES

El presente trabajo ha estudiado la influencia sobre los aspectos socioeconómicos derivados de la aplicación de medidas hidrológicas en una cuenca hidrográfica mediante la generación de un modelo empleando una metodología basada en la programación lineal, buscando la optimización en términos económicos.

A través de la generación, en un primer lugar, de un modelo teórico y de la aplicación de la misma metodología posteriormente para la generación de un modelo representativo de la cuenca del Segura, se han podido establecer una serie de conclusiones de naturaleza hidráulica y económica que pueden ser claves para afrontar los retos del futuro condicionados por los nuevos paradigmas climáticos que establecerán escenarios con menor cantidad de recursos, pero en los que se buscará siempre el mantenimiento de las condiciones ambientales:

- Es fundamental la gestión integral de la cuenca para lograr el equilibrio económico, social y ambiental de ésta. En el trabajo se han tratado todas las actividades presentes en la escala económico de la cuenca a través de hipótesis de agrupación por zonas y sectores de actividad, qué ha permitido conocer tanto el grado de satisfacción de sus demandas de forma localizada, como el beneficio económico derivado de cada actividad, bajo unas condiciones de contorno que han exigido el mantenimiento del caudal ecológico en cada punto de la cuenca.
- Una cuenca con unos niveles de explotación más equilibrados entre las diferentes zonas reduce el estrés hídrico de las zonas más sobreexplotadas, no implica una pérdida monetaria global para la cuenca y permite un aumento de la cohesión social, gracias al equilibrio en los niveles de satisfacción de demanda.
- Un pequeño aumento de los recursos destinados a las actividades más productivas en la cuenca, como la industria o las actividades de ocio -las cuales, además, presentan menor demanda-, puede revertir en grandes beneficios económicos en la cuenca. Si bien estas actividades, especialmente las relacionadas con el turismo, generan gran controversia entre los habitantes permanentes en la cuenca, el beneficio económico que suponen puede ser de gran interés para la inversión en infraestructuras y tecnología necesarias en una cuenca que presenta en la actualidad un déficit de alrededor de 400 hm³ anuales. Entre las inversiones más interesantes cabe resaltar aquellas que implicarán la disponibilidad de una mayor cantidad de recursos como la desalinización de agua de mar o el aumento de la capacidad de retornos de agua utilizada a la red, que permitirán que se reduzca el estrés hídrico en la cuenca.
- Otras inversiones como el aumento de la interconexión canalizada entre las diferentes zonas de la red y el aumento de las productividades de las actividades permitirán una mayor flexibilidad en los recursos y una atención a la demanda en un entorno más integral y dinamizado y una reducción de los recursos necesarios para lograr el mismo beneficio económico en la cuenca, respectivamente.
- Con relación a la conclusión anterior, una mayor capacidad de interconexión entre cuencas españolas resultaría beneficioso para el aprovechamiento de los recursos disponibles en nuestro país. Sin embargo, sería necesario una coordinación más dinámica entre administraciones del agua y una gran inversión en infraestructuras.



Además, la realización del trabajo ha permitido obtener conclusiones relativas a la generación del modelo mediante el uso de una metodología basada en la programación lineal, pues ésta puede ser empleada no sólo en el ámbito hidráulico, de abastecimiento y de gestión, sino que puede ser generalizable a la realización de modelos de otras ramas de conocimiento, gracias a la sencillez de la definición de sus condiciones de contorno y a la representatividad en sus resultados.

Si bien la definición es sencilla a nivel matemático, es importante destacar que el proceso de la toma de hipótesis es un punto crucial para que los resultados obtenidos sean fiables, especialmente cuando se pretende modelar redes complejas. Es necesario equilibrar los recursos (tiempo, capacidad computacional) con la complejidad y el grado de detalle del modelo. En este sentido la aplicación a un modelo real no sólo permite comprender, como en este caso el alcance de las propuestas, sino que es fundamental para validar la metodología utilizada.

Además, la programación lineal permite considerar relaciones lineales entre variables, pero es necesario adoptar hipótesis que reproduzcan de forma lineal relaciones que no lo son, como la correspondencia entre precio y demanda-oferta.

Finalmente, cabe destacar las posibilidades que presenta esta metodología para el estudio de escenarios de riesgos, pues si bien en este trabajo la función objetivo se ha determinado en términos económicos, es posible aplicarla para cualquier tipo de unidad de interés.²²



5. BIBLIOGRAFÍA

- Barreira, A. *La gestión de las cuencas hispanoportuguesas. El Convenio de Albufeira*. Fundación Nueva Cultura del Agua. Fuente:
<http://www.iidma.org/attachments/Publicaciones/hispanoportugal.pdf>
- B.O.E. Disposición 439 del B.O.E. Número 16, martes 19 de enero de 2016. Sec. I. Fuente:
<https://boe.es/boe/dias/2016/01/19/pdfs/BOE-A-2016-439.pdf>
- Cabrera Rodríguez, S. *Aplicación de la Programación Lineal a la agronomía*. Universidad de Castilla La Mancha. Fuente:
http://matematicas.uclm.es/ita-cr/web_matematicas/trabajos/248/Programacion_lineal.pdf
- Delacámara, G., Arenas, M., Marhubi, A, Rodríguez, M. *El sector del abastecimiento y saneamiento urbano en España*. Instituto IMDEA Agua, 2017. Fuente:
<http://www.madrid.org/bvirtual/BVCM019569.pdf>
- Elwood, N. *Heuristic simulation: an alternative to linear programming in developing forest management schedules*. Forest Ecology and Management, 1990. Volumen 35, páginas 303 – 310.
- Embid Irujo, A. *Problemática en la gestión del agua en regímenes descentralizados políticamente: el caso de España*. Ponencias Expo Zaragoza 2008, 2008. Fuente:
http://www.zaragoza.es/contenidos/medioambiente/cajaAzul/30S9-P2-Antonio_EmbidACC.pdf
- Fundación Botín. *Análisis académico del Plan Hidrológico de la Demarcación Hidrográfica del Segura 2015-2021 a la luz de modernos conceptos de la ciencia de los recursos del agua*. Fundación Botín, 2007. 978-84-15469-65-3
- Gallego Elvira, B., Maestre Valero, J. F., Martínez Álvarez, V. *Análisis de las pérdidas por evaporación en embalses de riego de la cuenca del Segura*. Jornadas de introducción a la investigación de la UPCT. Cartagena, 2008. ISSN 1888-8356, Nº. 1
- Gallego Elvira, B. *Análisis de la evaporación en embalses de riego y de su reducción con coberturas de sombreo*. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Cartagena. Cartagena, 2011. Fuente:
<https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=50170>
- Greenpeace. *La calidad de las aguas en España. Un estudio por cuencas*. Greenpeace, 2005. Fuente:
<https://archivo-es.greenpeace.org/espana/Global/espana/report/other/agua-la-calidad-de-las-aguas.pdf>



- Mercado, L. *Agua y los Objetivos de Desarrollo del Milenio (ODM)*. Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo. Fuente: <https://sustainabledevelopment.un.org/content/documents/3346mercado.pdf>
- Ministerio para la Transición Ecológica. *Sistema español para la gobernanza del agua. 2000 años planificando y gestionando los recursos con eficacia y seguridad*. Fuente: https://www.miteco.gob.es/es/agua/temas/sistema-espaniol-gestion-agua/0%20Catalogo%20gobernanza%20del%20agua_tcm30-215766.pdf
- Naciones Unidas. *Marco de Sendai para la Reducción del Riesgo de Desastres 2015 - 2030*. Ginebra (Suiza), 2015. Fuente: https://www.unisdr.org/files/43291_spanishsendaiframeworkfordisasterri.pdf
- Ostrom, E. *El gobierno de los comunes*. Ed.: Fondo de cultura económica. México, 2011. 9786071606174
- Pellicer Martínez, F. Martínez Paz, J.M. *Climate change effects on the hydrology of the headwaters of the Tagus River: implications for the management of the Tagus-Segura transfer*. Universidad Católica de Murcia, HESS, Volumen 22, 2018. 6473–6491, 2018.
- PWC. *La gestión del agua en España. Análisis y retos del ciclo urbano del agua*. Fuente: <https://www.pwc.es/es/publicaciones/energia/assets/gestion-agua-2018-espana.pdf>
- Sánchez Martínez, M.T., Rodríguez Ferrero, N., Salas Velasco, M. *La gestión del agua en España. La unidad de cuenca*. Universidad de Granada, 2011. Ed. Revista de estudios regionales, Nº 92. 0213-7585 (2011), PP. 199-220
- Uviera, L., *Programación lineal y no lineal*. Laboratoire de sécurité des procédés chimiques de l'INSA de Rouen, 2016. Fuente: <https://es.slideshare.net/LilivetUbiera/programacin-lineal-y-no-lineal>
- Villanueva Río, A. *La situación del agua en España: recursos, gestión y tendencias*. EOI, 2008. 8488723946, 9788488723949

Páginas web consultadas (a septiembre de 2019):

- <http://agro.iberf.es/>
- <https://economipedia.com/>
- <http://e-ducativa.catedu.es/>
- <https://www.efeverde.com/>
- <http://www.elperiodico.com/>



- <https://www.iagua.es/>
- <https://www.pepsimo.eu/2016/02/language-spanish-en-este-video-se.html>
- <https://es.wikipedia.org/>
- Asociación Española de Abastecimientos de Agua y Saneamiento:
<http://www.aeas.es/servlet/mgc>
- Comunidad ISM:
<http://www.comunidadism.es>
- Confederación Hidrográfica del Segura:
<https://www.chsegura.es>
- El blog de la CHS:
<https://confederacionhidrograficadelsegura.wordpress.com/>
- Fundación AQUAE:
<https://www.fundacionaquae.org/>
- Guía Nueva Cultura del Agua:
<https://www.fnca.eu/guia-nueva-cultura-del-agua/>
- Instituto Nacional de Estadística:
<https://www.ine.es/>
- International Water Association
<https://iwa-network.org/>
- Ministerio para la Transición Ecológica:
<https://www.miteco.gob.es/>
- Objetivos de Desarrollo Sostenible. Naciones Unidas:
<https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/water-and-sanitation/>
- Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo: Objetivos de Desarrollo del Milenio:
https://www.undp.org/content/undp/es/home/sdgoverview/mdg_goals.html
- Revista ambient@:
<https://sites.google.com/gl.miteco.es/ambienta>
- Sistema Español de Información sobre el Agua:
<http://hispagua.cedex.es/>



- Tribunal de las Aguas de la Vega de Valencia:
<https://www.tribunaldelasaguas.org/es/>
- We Are Water Foundation:
<https://www.wearewater.org/>